

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**GRAFIČKI FAKULTET**

**ZAVRŠNI RAD**

**ANTE MIKULIĆ**

Smjer: Tehničko-tehnološki

**ZAVRŠNI RAD**  
**GAMUT LCD MONITORA U OVISNOSTI O KUTU**  
**GLEĐANJA**

Mentor:

Doc.dr.sc, Ante Poljićak

Student:

Ante Mikulić

Zagreb, 2015.

Rješenje o odobrenju teme završnog rada

## SAŽETAK

Predmet ovog završnog rada je odrediti utjecaj kuta gledanja na promjenu gamuta boja na LCD ekranu laptopa. Zadatak je ispitati CIELAB vrijednosti zaslona u odnosu na njegovu okomicu, a potom pod kutem od  $45^\circ$  u odnosu na normalu po x-osi ekrana i pod kutem od  $45^\circ$  u odnosu na normalu po y-osi ekrana te uspoređivanjem ispitanih rezultata odrediti za koliko će se povećati tj. smanjiti gamut boja na zaslonu. Teorijski dio se općenito bavi osnovnim pojmovima vezanim za LCD tehnologiju prikazivanja informacije na ekranu i kolorimetriju potrebnim za sam eksperimentalni dio rada koji se bavi interpretacijom dobivenih vrijednosti kroz tablice i grafove.

Ispitivanje se obavljalo u kontroliranim uvjetima pomoću spektoradiometra konica minolta, CS-200, laptopa i još jednog računala na kojem su se prikazali rezultati ispitivanja u programskom okruženju CS-10S. Dobiveni rezultati su se obrađivali u programskom okruženju excel pomoću kojeg se izračunala kolorimetrijska razlika,  $\Delta E$  te uspoređivanjem sa referentnim vrijednostima utvrdilo se smanjenje volumena gamuta.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. TEORIJSKI DIO .....	2
2.1. LCD Tehnologija .....	2
2.1.1 Povijesna podloga .....	3
2.1.3 Tipovi LCD zaslona .....	11
2.2 KOLORIMETRIJA .....	17
2.2.1 Boja i doživljaj boje .....	17
2.2.2. Prostori boja .....	23
2.2.3 Kolorimetrijska razlika, $\Delta E$ .....	34
2.2.4. Instrumentalne metode mjerenja boje .....	35
3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	38
3.1 Opis ispitivanja .....	38
3.2. Rezultati mjerenja .....	39
3.2.1 Usporedba mjerenja pod drugim kutevima .....	39
3.2.2 Usporedba gamuta .....	41
4. ZAKLJUČAK .....	45
5. LITERATURA .....	46
6. POPIS SLIKA .....	47
7. POPIS TABLICA .....	48

# 1. UVOD

U ovom završnom radu objasniti će se i ispitati promjena volumena gamuta zaslona laptopa koji koristi LCD tehnologiju mijenjanjem kuta pod kojim mjerni uređaj, u ovom slučaju spektoradiometar mjeri spektralno zračenje monitora i daje odgovarajuće  $L$ ,  $a$  i  $b$  te  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  vrijednosti. Na taj način će se zapravo simulirati ljudsko oko koje se najbolje može prikazati u Lab prostoru boja budući da je upravo taj prostor boja najbliži oku po poimanju boja. Svjetlost je elektromagnetsko zračenje sastavljeno od valnih duljina koje pripadaju tzv. vidljivom dijelu spektra. Čovjekovo oko može raspoznati boje zahvaljujući čunjićima i štapićima, fotoreceptorima koji pretvaraju upadno sunčevo svjetlo u električne impulse koji se obrađuju u našem mozgu i doživljaju kao određene boje. Postoje tri vrste čunjića, po jedan za svaku od tri primarne boje (crvena, zelena i plava). Kombinacijom primarnih boja u našem mozgu nastaje psihofizički doživljaj boje. Općenito govoreći, svaka boja je definirana sa tri parametra; ton, zasićenje i svjetlina. To su tzv. psihološki atributi boje. LCD tehnologija je tehnologija prikaza slike na ekranu koja se temelji na tekućim kristalima slučajno otkrivenim krajem 19. stoljeća, a komercijalno dostupnim tek početkom sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Zbog male potrošnje energije korišteni su za zaslone na digitalnim satovima, a potom i na kalkulatorima da bi svoju punu primjenu doživjeli tek devedesetih godina prošlog stoljeća kada se ta tehnologija počinje intenzivnije razvijati. Samo ispitivanje se provodi u kontroliranim uvjetima kako bi rezultati što bolje prikazali koliki je zapravo utjecaj kuta gledanja na zasićenost i svjetlinu tona boje.

## **2. TEORIJSKI DIO**

### **2.1. LCD Tehnologija**

LCD (eng. Liquid crystal display) je skraćenica koja se upotrebljava za oslovljavanje jedne od tehnologija prikaza slike na ekranu. Kako i samo ime kaže, navedena tehnologija se bazira na primjeni tekućih kristala. Tekući kristali su materijali koji imaju karakteristike krutine i tekućine. Prvi put su otkriveni krajem 19. st. zahvaljujući jednom austrijskom botaničaru koji je istraživajući kolesterol u mrkvama, slučajno opazio neku tvar koja je imala dvije temperature otapanja, reflektirala kružno polarizirano svjetlo te mijenjala smjer upadne polarizirane svjetlosti [2].

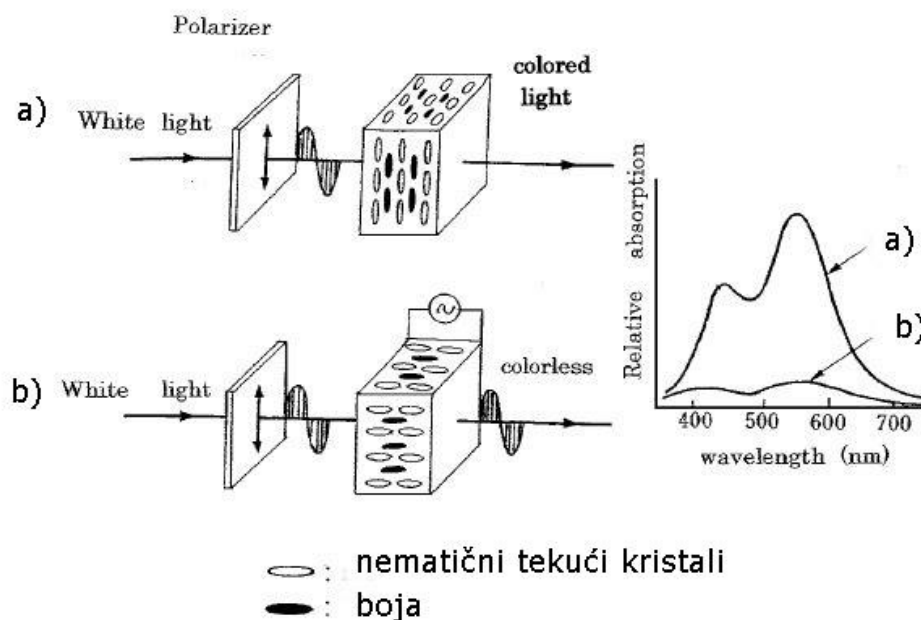
Postoje dvije skupine tekućih kristala; termotropne i liotropne. Termotropni tekući kristali su osjetljivi na promjenu temperature dok liotropni kristali reagiraju na vodu ili otapalo. Liotropni kristali su prisutni, primjerice, u našem mozgu, živčanom sustavu i mišićima. Prvi otkriveni tekući kristali bili su termotropni. Jedni od najznačajnijih tekućih kristala iz te skupine, koji se koriste u izradi LCD ekrana su tzv. Nematični kristali otkriveni početkom 20. stoljeća. Primjenom polariziranog svjetla ti kristali na staklenoj površini poprimaju zavojitu strukturu. Lako se poravnavaju, deformiraju i mijenjaju smjer orijentacije i osjetljivi su na promjene u električnom i magnetskom polju, toplinu ili pak na mehanički utjecaj. Zahvaljujući svojstvu dvostrukog loma (refrakcije) oni preusmjeravaju smjer polariziranog svjetla niz dužu os molekule. Zbog svih navedenih svojstva koriste se u elektroničkoj industriji. LCD ekrani su dostupni u dvije osnovne postavke: pasivna ili jednostavna matrica korištena u kalkulatorima i digitalnim satovima i aktivna matrica ili TFT, korištena kod izrade zaslona računala, televizora i sličnih medija koji traže brz odaziv zaslona. Kod TFT-a imamo tranzistore i diode koji su vezani za svaki piksel i omogućuju individualnu kontrolu i adresiranje svakog piksela neovisno o susjednome. U sklopu TFT-a razlikujemo TN (eng. Twisted Nematic) IPS (eng. In plane switching), te VA (eng. Vertical alignment) konfiguracije.

### 2.1.1 Povijesna podloga

Sve je započelo observacijom Friedricha Reinitzera, austrijskog botaničara koji je davne 1888. godine, prilikom proučavanja kolesterola u mrkvi, opazio jednu neobičnu supstanciju koja je pokazivala do tada nepoznata svojstva. Ta tvar je pri sobnoj temperaturi bila u čvrstom stanju, no promjenom temperature na 145 stupnjeva, tvar bi se topila, postajala maglovito bijela i viskozna [2]. To je bilo stanje između krutine i tekućine (mezofaza). Daljnjim povećanjem temperature na 179 stupnjeva, kristal bi prešao u tekuće prozirno stanje [2]. Nejasno što je otkrio, Reinitzer se odlučio obratiti svom prijatelju koji je bio vrstan kristalograf koji bi možda više znao o tom neobičnom fenomenu. Promatrajući optičku strukturu mrkvi pod mikroskopom između dvije staklene podloge i postupno povećavajući temperaturu on je primijetio tzv. dvostruki lom u mezofazi, što je zapravo karakteristika tekućine. On je ustvari otkrio spoj kloresteril benzoat [1]. Međutim pošto je taj spoj imao karakteristike i kristala i tekućine nazvao ga je tekući kristali (njem. fließender Krystalle) [2]. Početkom 20. stoljeća tekući kristali nisu bili osobito zanimljivi znanstvenicima tako da se više s njima trgovalo nego radilo. Tijekom 20-ih i 30-ih godina prošlog stoljeća nešto istraživanja o njihovoj optičkoj strukturi provodilo se u Francuskoj, Njemačkoj, Engleskoj i Rusiji [4]. Prvi značajniji napredak postignut je početkom 60-ih godina 20. st. od strane američke kompanije RCA Laboratories (eng. Radio corporation of America) [2]. R. Williams iz RCA je otkrio elektrooptičke karakteristike tekućih kristala. Postavio ih je između dvije staklene površine te zagrijavao. Svaka površina je bila presvučena slojem kositrova oksida koji je bio elektroda. Primjenom električnog polja okomitog na elektrode tj. kristale uočio je da se kristali orijentiraju paralelno sa smjerom el. polja tj. okomito na elektrode svojom dužom molekulom (nazvao ih je domene). Poslije toga jedan drugi znanstvenik iz RCA, Heilmeyer koristio je također tekuće kristale nematičnog tipa i pritom koristio specifičnu boju. Ta boja je absorbirala svjetlost kad je smjer linearno polarizirane svjetlosti bio paralelan sa dužim osi molekule kristala a propuštala to isto svjetlo kad smjer polarizacije nije u smjeru duže osi molekule kristala. Boju je nazvao gost a tekuće kristale domaćin. Zatim ih je postavio između dvije staklene podloge presvučene indij kositrenim oksidom koji su predstavljale elektrode te ih zagrijavao. Kada se ne bi koristio napon, tekući kristali bi se postavili okomito na smjer apsorbirane svjetlosti koje bi se emitiralo kao obojeno



svjetlo. Primjenjujući napon tj. električno polje obojeni kristali bi se posložili paralelno sa smjerom običnih kristala i smjesa bi postala prozirna pa bi izlazna svjetlost bila neobojana [2]. Taj princip je prikazan na slici 1.



Slika 1. Prikaz principa gost-domaćin

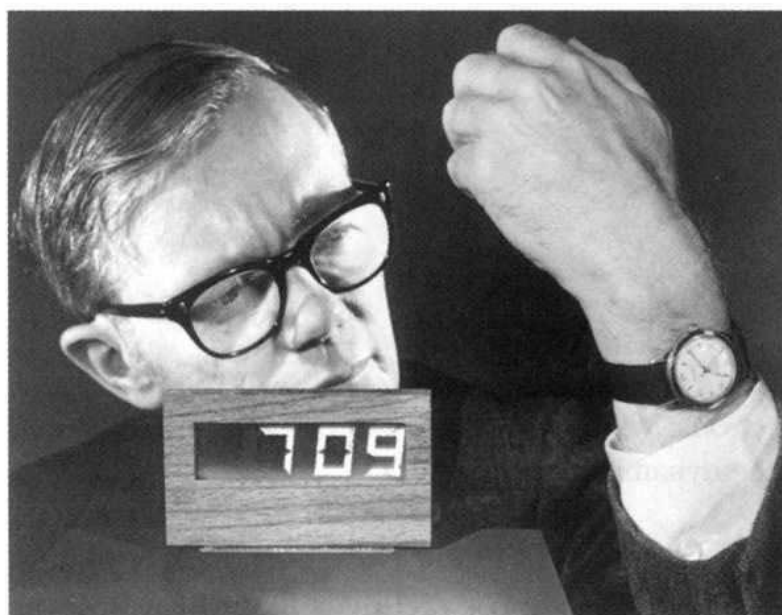
Izvor: H. Kawamoto (2002.) *The History of Liquid-Crystal Displays*, Silicon Image, Nara

Budući da boje i tekući kristali nisu bili kemijski stabilni tijekom dužeg vremenskog perioda i zbog potrebe za stalnim zagrijavanjem domaćina u nematičnoj fazi prešlo se na uporabu novog tipa sintetiziranih tekućih kristala tzv. APAPA (anisilden para-aminofenilacetat) koji su pri korištenju postali elektrodinamički nestabilni [2]. Kao posljedica se javilo intenzivno raspršenje svjetlosti-stvaranje bijele površine. Povećanjem električnog polja povećavala bi se i svjetlina. Heilmeyer je to nazvao DSM (eng. Dynamic scattering mode) ili dinamičko raspršenje. Odvija se u par koraka:

1. Nematični kristali su poravnati okomito na paralelne ploče
2. Primjenom električnog polja okomito na ploče kristali bi se poravnavali paralelno sa staklenim pločama

3. Kod nematičnih kristala el. provodljivost je veća u smjeru duže osi molekule nego u smjeru kraće što može izazvati nakupljanje naboja
4. Daljnim pojačanjem el. polja molekule postaju mehanički nestabilne te nasumično raspršuju svjetlost vezanu za molekulu pa se doimaju bijeli

Tim zapanjujućim otkrićem su zapravo postavljeni temelji LCD tehnologije. RCA je 1968. održala konferenciju za novinare u New Yorku gdje su predstavili potpuno novu vrstu ekrana dotad. Ekran je bio u koječemu drukčiji od CRT monitora. Bio je lagan, jako tanak i troši jako malo struje što je zaintrigiralo znanstvenike diljem svijeta. To je ujedno bio početak razvoja digitalnih satova i kalkulatora u Americi, Japanu i Njemačkoj [2].

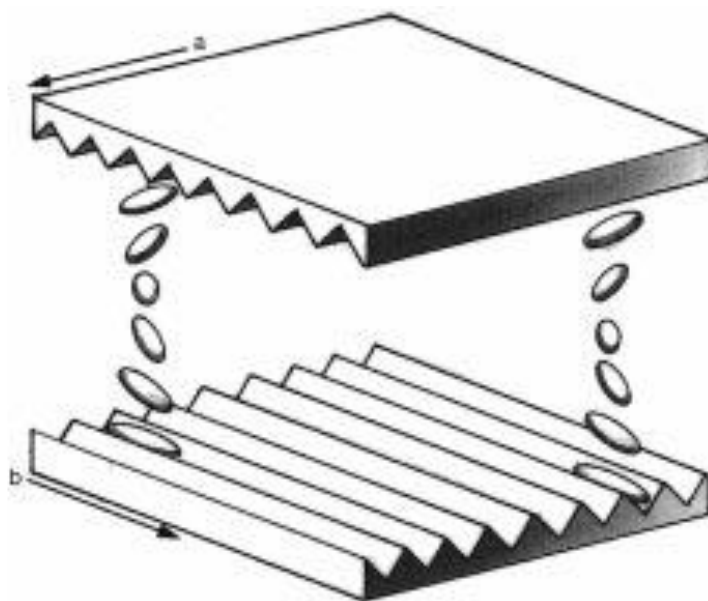


*Slika 2. Prvi LCD digitalni sat koji je koristi DSM*

*Izvor: J.A.Castellano (2005.) Liquid Gold, World Scientific Publishing, Singapore*

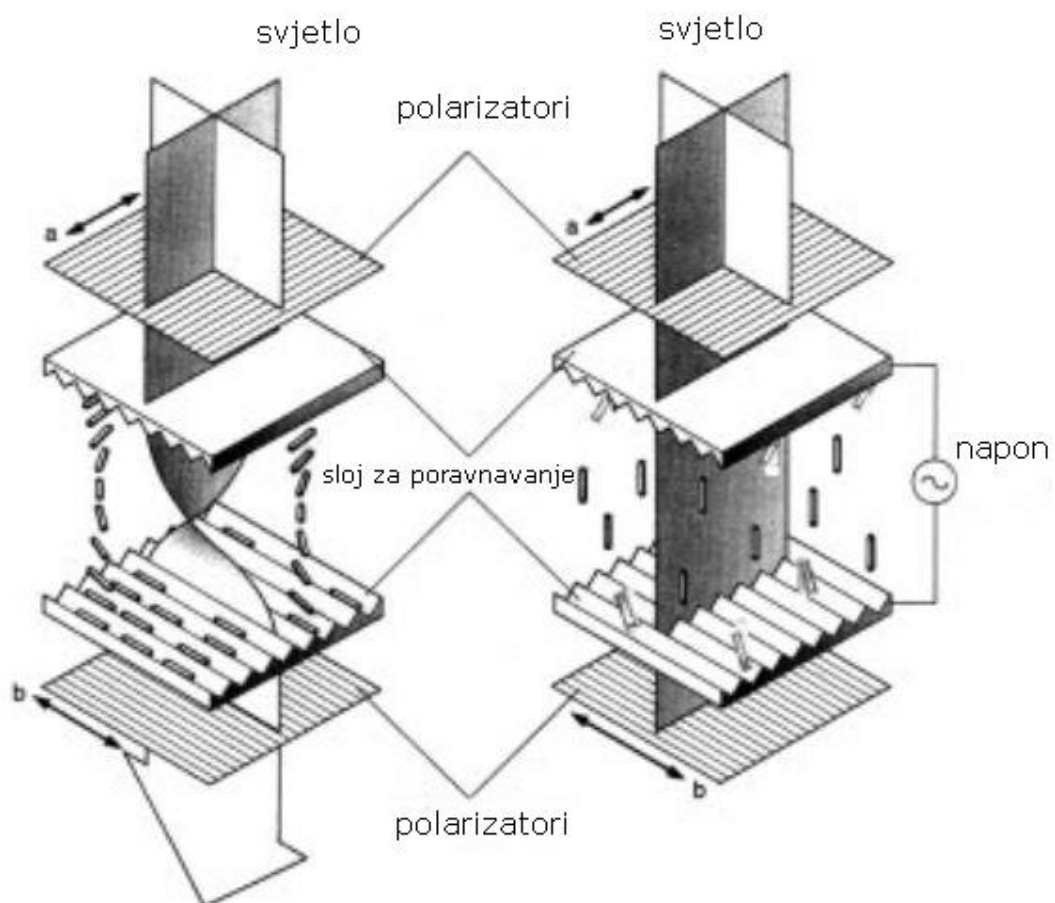
Nadalje, dodatak dvaju polarizatora na staklene površine značilo je otkrivanje novog stanja tzv. TN stanje (eng. Twisted nematic). Konkretno, upadna svjetlost dolazi na gornji polarizator kroz koji svjetlost paralelna sa a osi polarizatora. Smjer polarizirane svjetlosti se zarotira za 90 stupnjeva niz zavojitu strukutu tekućih kristala da bi na kraju prošla kroz

donji filter i dala obojano svjetlo. Primjenom napona, molekule tekućih kristala se poravnavaju u smjeru električnog polja, dakle okomito na gornji polarizator, te se zbog toga polarizirana svjetlost neće zaokrenuti za 90 stupnjeva pa neće ni moći proći kroz donji polarizator. Posljedica toga je crni ekran [2]. Na slici 3. i 4. je prikazan taj princip.



*Slika 3. Kretanje molekula tekućih kristala*

*Izvor: H. Kawamoto (2002.) The History of Liquid-Crystal Displays, Silicon Image, Nara*



*Slika 4. TN princip sa i bez primjene električnog polja*

*Izvor: H. Kawamoto (2002.) The History of Liquid-Crystal Displays, Silicon Image, Nara*

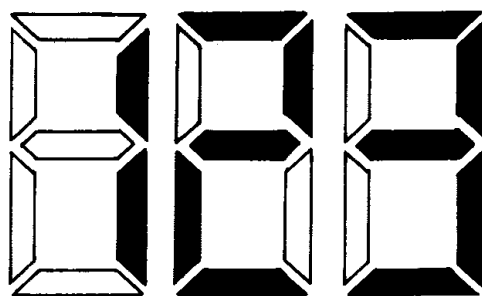


*Slika 5. Prvi proizvod TN principa: digitalni sat*

*Izvor: H. Kawamoto (2002.) The History of Liquid-Crystal Displays, Silicon Image, Nara*

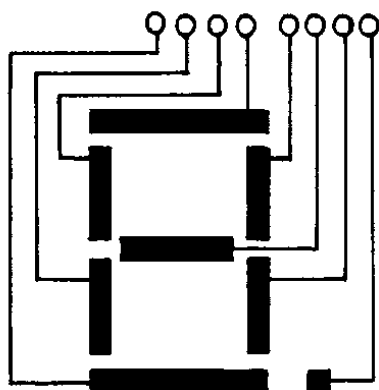
### **2.1.2 Princip rada LCD zaslona**

Digitalni satovi i kalkulatori, prvi uređaji koji su koristili LCD zaslon, doživjeli su ogroman komercijalni uspjeh. No s vremenom su cijene tih uređaja se smanjivale jer su se na tržištu pojavili jeftiniji proizvođači iz Kine i Tajvana pa su se ti uređaji ubrzo mogli kupiti po jednoj desetini stare cijene u predgrađima velikih gradova i maloprodajnim lancima [2]. Iz tog razloga su se elektronske tvrtke iz Japana odlučile pronaći novi način primjene LCD tehnologije kako bi se istakli na tržištu i da bi mogli ponovo diktirati cijene te na koncu tako proširiti svoje tržište. U kalkulatorima i satovima prikazivali su se samo brojevi pomoću tzv konfiguracije „8“ koja je imala 7 polja ili sektora. No ako bi se htjela kojim slučajem prikazati slova, bilo je potrebno puno više sektora.



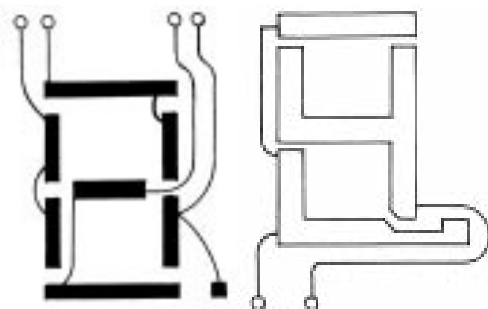
Slika 6. 7 polja ili sektora

Izvor: H. Kawamoto (2002.) *The History of Liquid-Crystal Displays*, Silicon Image, Nara



Slika 7. konfiguracija 8

Izvor: H. Kawamoto (2002.) *The History of Liquid-Crystal Displays*, Silicon Image, Nara



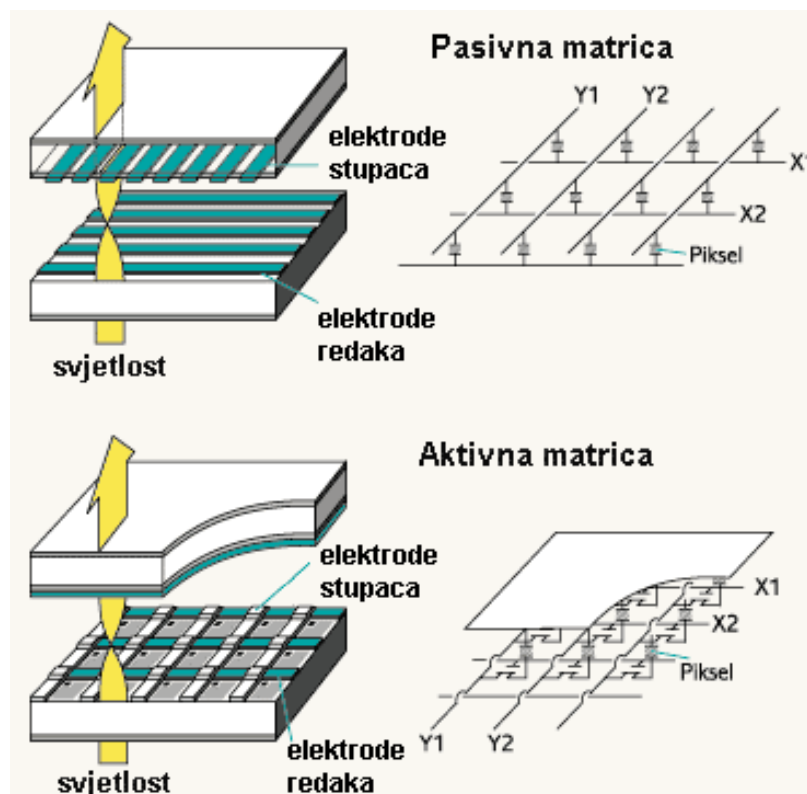
Slika 8. Gornja(lijevo) i donja(desno) elektroda

Izvor: H. Kawamoto (2002.) *The History of Liquid-Crystal Displays*, Silicon Image, Nara

Nadalje, kako bi se formirala slika na ekranu nužno je aktivirati određene piksele koji čine tu sliku. Pikselski ili slikovni element je najmanji dio slike. Ako postoji  $N$  redaka i  $M$  stupaca tada ima  $M \times N$  piksela u okviru (eng. Frame). To znači da jedan piksel ima  $1/N$  vremena da prikaže jedan frame. Adresiranje piksela se može izvesti pomoću dva načina: pasivnih i aktivnih matrica [2].

Kod adresiranja piksela pasivnom matricom, svaki piksel je adresiran jednim stupcem i jednim retkom. Svaki stupac ili redak sadrži strujni krug. Na donjoj staklenoj podlozi imamo  $X$  elektroda, a na gornjoj  $Y$  elektroda. Za odabiranje piksela, apliciraju se električni signali na  $X$  i  $Y$  vodiče u određenim vremenskim intervalima [3]. To se može jasno vidjeti na slici 9. Konkretno, uključuju se svi pikseli u jednom stupcu koji sadrže taj piksel, a potom svi pikseli u retku koji imaju traženi piksel, a njihovo preklapanje daje potrebni piksel. Složeni tekstualni ili slikovni prikazi traže puno stupaca i redaka te zahtijevaju više operacija u jednom radnom ciklusu (ciklus aktivacije stupaca i redaka za osvjetljavanje jednog piksela). Povećanjem broja stupaca i redaka povećat će se i rezolucija ekrana no odziv, kut gledanja i kontrast će biti jako loši. Ako pak povećamo napon, ubrzat će se gibanje molekula kristala i dobit ćemo veći odziv ali i veći „crosstalk“ (pojava da napon jednog piksela ometa napon drugog piksela) koji reducira kontrast [2]. Može se desiti da poslani podatkovni signali neće imati dovoljno vremena da se kompletno prikažu i frame će biti nedovršen.

Zbog nemogućnosti pružanja veće rezolucije, brzog odaziva i kontrole nad individualnim pikselima potrebnim za računala i televizije u boji, uvela se aktivna matrica. Ona nije imala problema sa brojem operacija u jednom radnom ciklusu i crosstalk-om zahvaljujući pojedinačnom adresiranju piksela pomoću ugrađenih tranzistora i kondenzatora. Tranzistori imaju zadaću uključivati i isključivati pojedinačne piksele, a kondenzatori pospremaju signal za pojedinačni piksel. A budući da je uključivanje tranzistora bilo brzo, više redaka i stupaca je moglo biti adresirano i zapisano u jednom radnom ciklusu povećavajući tako rezoluciju. Tranzistori rade pasivno, binarno i nelinearno pa je niski napon dovoljan za rad te uz to štedi energiju, smanjuje zagrijavanje i crosstalk. Zato će se upravo taj način adresiranja piksela koristiti za ekrane jako velike rezolucije, a da bi se to izvelo potreban je tzv. TFT (eng. Thin film transistor), niskonaponski tranzistor i koji može upravljati milijunima piksela u LCD-u kao primjerice u televiziji [2].



Slika 9. Zaslona sa pasivnom i aktivnom matricom

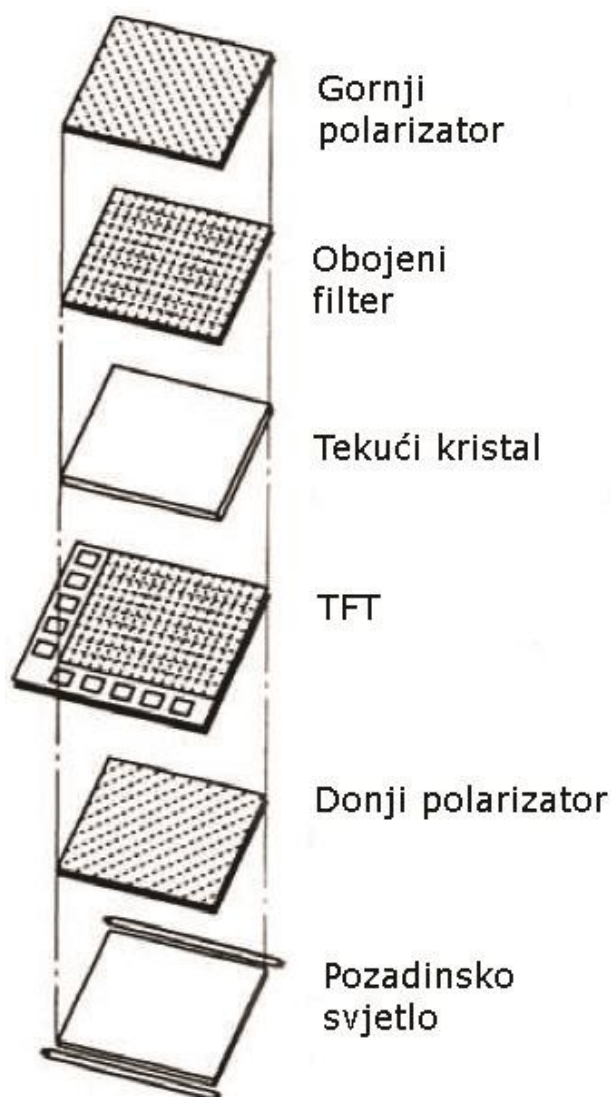
Izvor: <http://www.prad.de>

### 2.1.3 Tipovi LCD zaslona

TFT (eng. Thin film transistor) podrazumijeva uporabu tranzistora ili dioda koji su spojeni na svaki piksel (za svaku boju piksela potreban je jedan tranzistor). Oni imaju zadatak uključivati ili isključivati pojedine piksele. Tekući kristali se nalaze između dvije staklene površine, dvije TFT podloge, obojenih filtera i polarizatora. Obojeni filter se sastoji od elektrode koja je izrađena od indij kositrenog oksida. Da bi se postigla dobra kvaliteta slike, prostor između dvije staklene podloge mora biti strogo kontroliran. Tekući kristali su nematičkog tipa i kada su postavljeni paralelno sa gornjim polarizatorom, upadno polarizirano svjetlo se zakreće spiralno za 90 stupnjeva poput samih kristala i prolazi kroz donji polarizator pri tom emitirajući obojeno svjetlo. Primjenom napona električnog polja, molekule kristala se postavljaju okomito na polarizator i paralelno sa smjerom el. polja te gube spiralni oblik pa ne preusmjeravaju više polarizirano svjetlo i on ne može proći kroz donji polarizator odnosno biva blokirano donjim polarizatorom



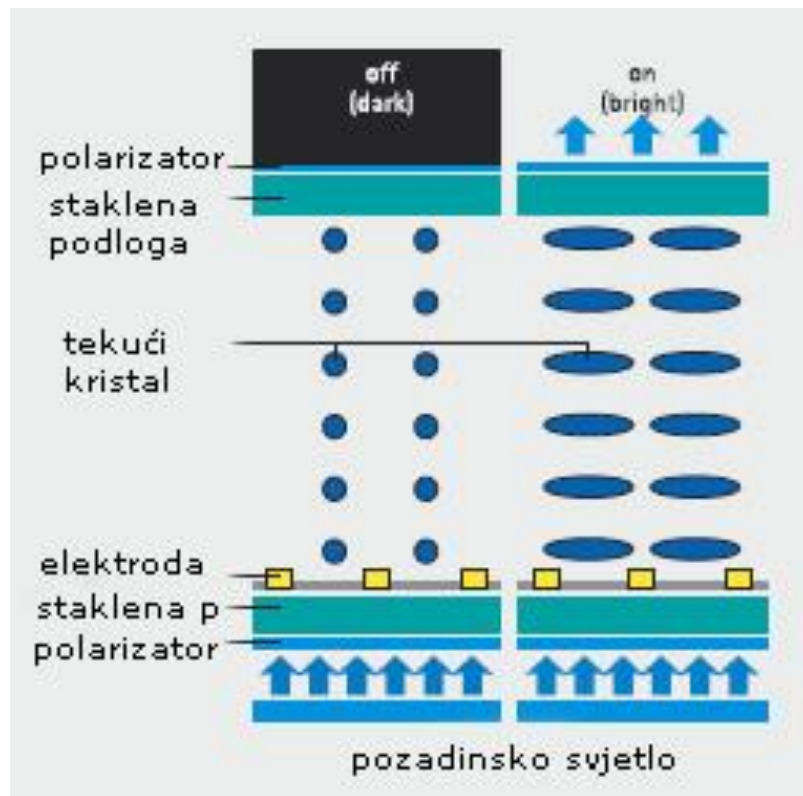
[3]. Tranzistori kontroliraju kut zakretanja kristala, a tako i intenzitet crvene, zelene i plave svjetlosti. Signali za prebacivanje se apliciraju na X elektrodu a video signali na Y elektrodu. Prednosti TFT LCD-a su kvaliteta prikaza boja i brz odaziv ekrana a mana je cijena i kvar tranzistora što dovodi do defektnog piksela pa se boja ne mijenja. Piksela može bi osvijetljen (crvene zelene i plave točke na ekranu) ili može bit tzv. „mrtvi“ piksel koji se prikazuje kao crna točka na bijeloj pozadini.



Slika 10. Sastavni dijelovi TFT LCD-a

Izvor: T.Tsukada (2003.) *Liquid-Crystal Displays Addressed by Thin-Film Transistors*, [On-line] 29, Taylor & Francis e-Library, Tokyo

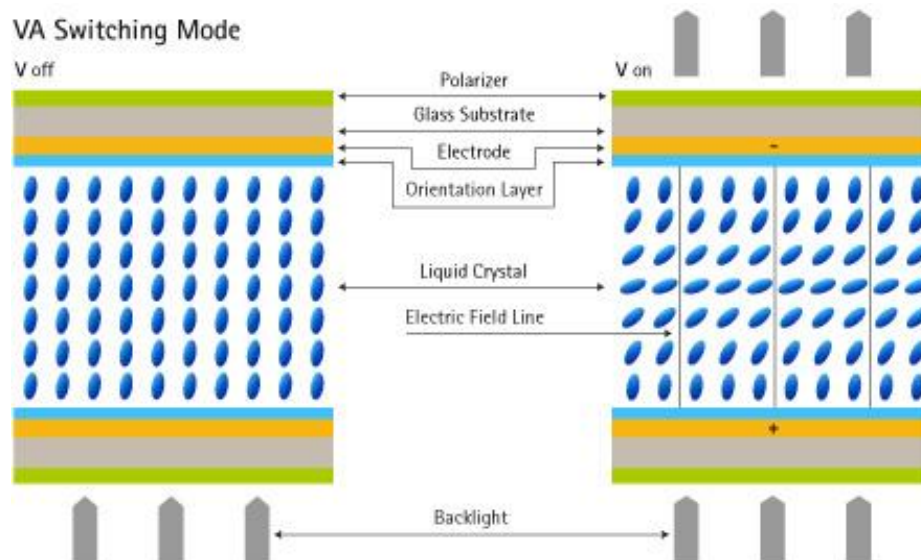
Da bi se riješio problem mrtvih piksela i povećao kut gledanja na LCD-u, Japanska tvrtka Hitachi je razvila IPS (eng. In plane switching) tehnologiju, još poznatiju kao Super-TFT. IPS tehnologija omogućuje puno veći kut gledanja (do 170 stupnjeva) istovremeno zadržavajući isti kontrasti i druge karakteristike TFT tehnologije. Za razliku od klasične TFT tehnologije, gdje je jedna elektroda montirana na gornjoj staklenoj podlozi a druga na donjoj staklenoj podlozi, kod IPS tehnologije, sve elektrode se nalaze na istom mjestu. To omogućuje precizniju kontrolu nad poravnavanjem tekućih kristala [3]. Nadalje, koristi se horizontalno polje umjesto vertikalnog, a molekule kristala se zakreću u ravnini paralelnoj sa staklenom podlogom [1]. Kada se ne koristi napon, tekući kristali su paralelni sa staklenom podlogom i elektrodama te nisu vezani za te podloge. Primjenom napona, molekule tekućih kristala se mogu zakretati za 90 stupnjeva u smjeru električnog polja istovremeno bivajući paralelni sa staklenim podlogama. Budući da je molekulska orijentacija kristala konstantna, kut gledanja je znatno poboljšán. Mada se povećanjem kuta gledanja smanjuje svjetlina, reprodukcija boja ostaje ista. Problem sa mrtvim pikselom doskočilo se primjenom seta filtera (polarizatora) koji su međusobno okomiti jedan na drugi, pa će upadno svjetlo koje prolazi kroz neaktivni piksel biti u potpunosti apsorbirano od drugog filtera. Mane IPS tehnologije su slabiji kontrast zbog smještaja elektroda na isto mjesto i slabiji odaziv ekrana zbog veće potrošnje energije i slabijeg vremenskog odaziva električnog polja.



Slika 11. IPS LCD tehnologija

Izvor: <http://www.prad.de>

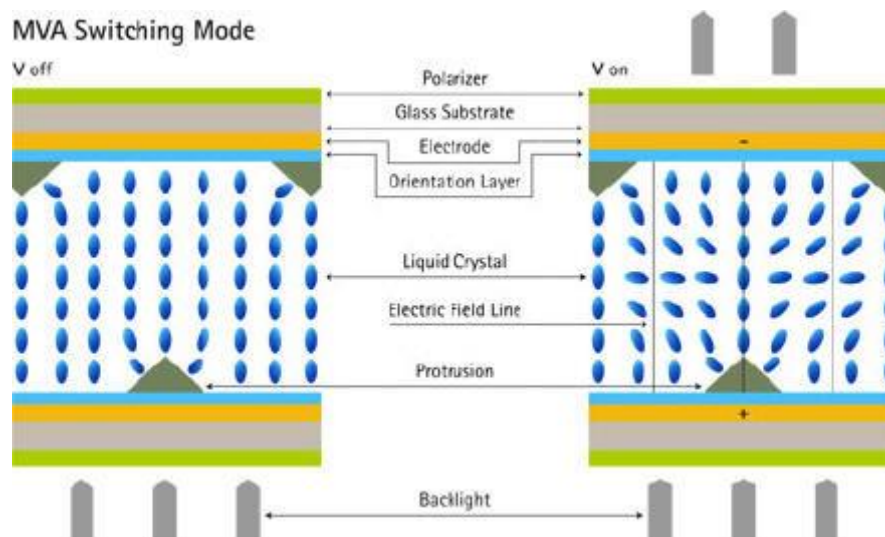
Sljedeća tehnologija, zvana VA (eng. Vertical alignment), razvijena je da bi se poboljšale karakteristike postojeće TFT tehnologije. Dodatkom silana ( $\text{SiH}_4$ ) na površinu indij kositrenog oksida, tekući kristali uz staklenu podlogu postaju okomiti na nju [3]. U tom položaju tekući kristali ne propuštaju upadno polarizirano svjetlo. Bez primjene napona, upadna svjetlost ne prolazi kroz kristale, što rezultira u jako dobrom kontrastnom omjeru slike. No primjenom napona, molekule kristala se orijentiraju u smjeru tog el. polja tj. prelaze iz vertikalnog u kosi položaj pa će se propustiti nešto svjetlosti (električki kontrolirana dvostruka refrakcija) [1]. Ova tehnologija omogućuje velike kutove gledanja (oko 140 stupnjeva u svim smjerovima) i visok kontrast uz veću svjetlinu i vrijeme odziva od 25 msec. VA tehnologija troši i manje struje od IPS-a ali i dalje previše za uređaje na bateriju [3].



Slika 12. VA LCD tehnologija

Izvor: <http://www.prad.de>

Postoji još jedna modifikacija VA tehnologije, a zove se MVA (eng. Multi-domain vertical alignment) koja uključuje korištenje UV svjetla i dodavanje rubova piramidalnog oblika u svaku ćeliju kristala. To su površine od kojih svaka sadrži svoju domenu gdje su kristali orijentirani drukčije u odnosu na drugu domenu. To daje poboljšani kut gledanja ekrana istodobno zadržavajući visok kontrast [3].



Slika 13. MVA LCD tehnologija

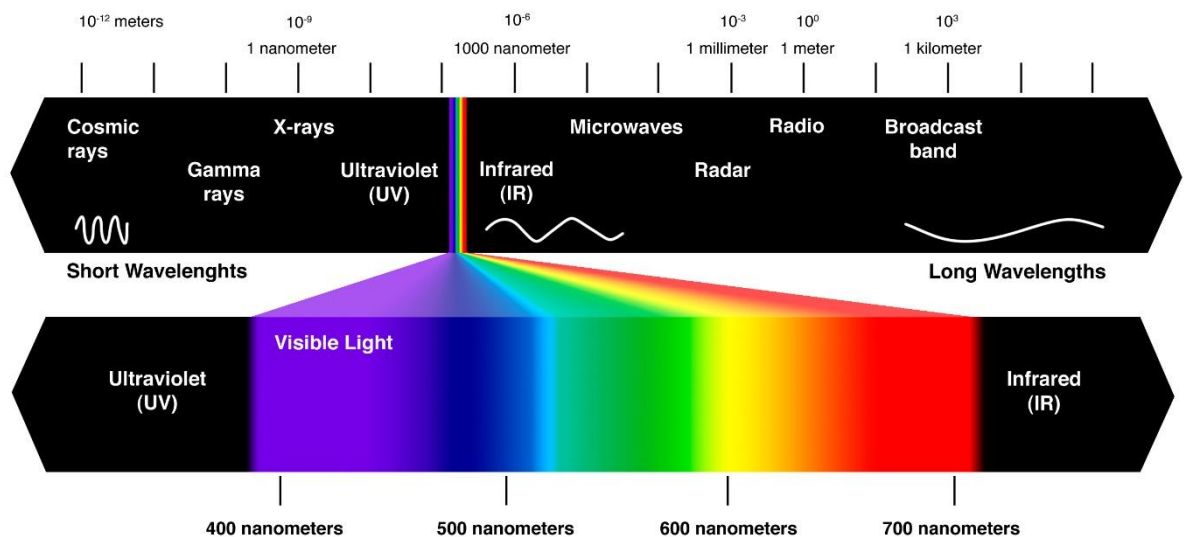
Izvor: <http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2011/09/Visible-spectrum.jpeg>

OLED (eng. organic light emitting diode) je tehnologija prikaza informacije na ekranu koja za razliku od LCD tehnologije stvara svjetlost pomoću ugrađenih dioda pa nema potrebe za polarizirajućim filterom i dodatnim osvjetljenjem. Zbog te činjenice, LCD ekrani troše više energije. Postoje OLED ekrani sa aktivnom i pasivnom matricom. Kod izvedbe se pasivnom matricom (PMOLED), energija se šalje u stupac i redak u kojem se određeni piksel nalazi, a povećanjem energije povećava se i svjetlina piksela [10]. Kod OLED ekrana sa aktivnom matricom (AMOLED), svaki piksel sadrži TFT koji regulira jakost osvjetljenja. AMOLED ekran omogućuje veći kontrast slike i bolju vidljivost pri ambijentalnom svjetlu jer ne dolazi do velike refleksije svjetlosti kao sa LCD zaslonom [10]. Zbog toga je jako popularna u mobilnoj industriji jer omogućuje korisniku dobru vidljivost pri dnevnom svjetlu.

## 2.2 KOLORIMETRIJA

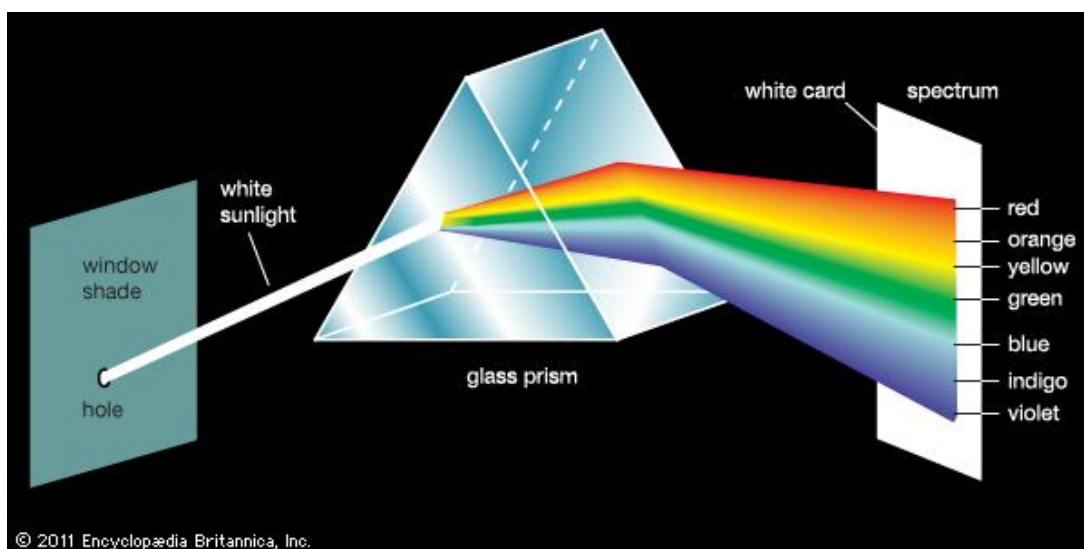
### 2.2.1 Boja i doživljaj boje

Boja je psihofizički doživljaj uzrokovan nekim od izvora svjetlosti, osjetilom vida te promatranim objektom. Izvori svjetlosti mogu prirodni (Sunce) ili umjetni (lampa). Svjetlo je elektromagnetsko zračenje sastavljeno od kraćih i dužih valnih duljina. Čovjekovo oko može prepoznati valne duljine od 380 nm do 750 nm, i te se valne duljine u ljudskom oku percipiraju kao boje. One zajedno čine tzv. bijelo svjetlo. Stoga se taj dio elektromagnetskog zračenja naziva se vidljivi spektar. Do tog otkrića došao je engleski fizičar Isaac Newton još davne 1671. godine propuštajući uski snop bijelog svjetla pod određenim kutom kroz prizmu. Prolaskom svjetlosti kroz prizmu došlo je do disperzije svjetlosti na boje različitih valnih duljina koje su se potom projicirale na platno. Tako primjerice, valne duljine od 380 do 500 nm daju ljubičasto-plavu boju, valne duljine od 520 do 565 nm zelenu te između 625 i 700 nm imamo crvenu svjetlost. Elektromagnetsko zračenja valnih duljina kraćih od 380 nm su UV zrake, x zrake ili gama zrake, a zračenja valnih duljina iznad 750 nm nazivaju se IR zrake, radio valovi.



Slika 14. Vidljivi dio spektra elektromagnetskog zračenja

Izvor: <http://scienceblogs.com/startswithabang/files/2011/09/Visible-spectrum.jpeg>



Slika 15. Newton-ov eksperiment sa staklenom prizmom

Izvor: <http://www.britannica.com>

Ukoliko dođe do apsorpcije ili refleksije ukupnog spektra „bijelog“ spektra promatrač će doživjeti određenu boju. Obojena tijela reflektiraju boju jednaku njihovoj boji pa će to tijelo biti one boje čija je valna duljina je najvećim dijelom reflektirana tj. transmitirana [6]. Dođe li do potpune apsorpcije upadnog svjetla tada će promatrani objekt djelovati crno a pri potpunoj refleksiji, objekt će djelovati bijelo.

Doživljaj boje nastaje u mozgu zahvaljujući dvama fotoreceptorima u oku; čunjićima i štapićima. Upadno svjetlo prolazi kroz leću oka te dopijeva u mrežnicu gdje fotoreceptori pretvaraju upadno svjetlo u električne impulse koji se u mozgu registriraju kao ton određen boje.

Štapići se nalaze vanjskom rubu mrežnice i osjetljivi su na niske razine svjetlosti, a neosjetljivi na boje pa su odgovorni za doživljaj svjetline pojedine boje [6].

Čunjići se nalaze u središnjem dijelu mrežnice (žuta pijega) i mogu razlikovati boje pa su odgovorni za doživljaj tona boje [6].

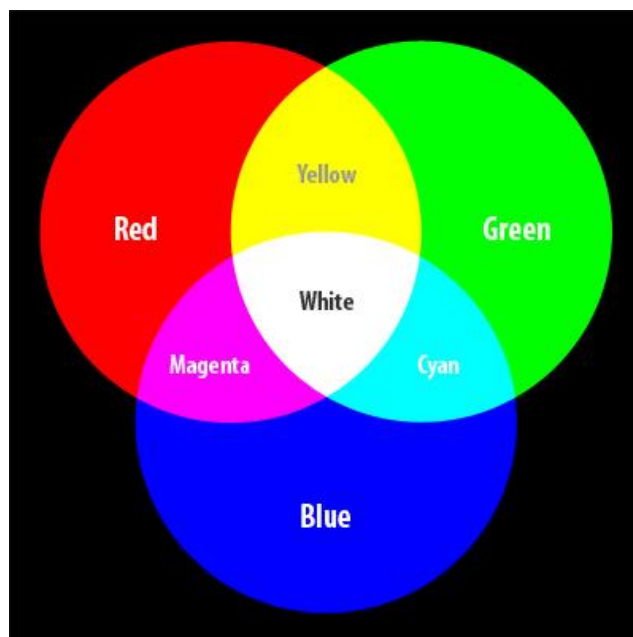
Nakon Newtonova pokusa sa prizmom, jedan drugi znanstvenik imena Mariotte je konstatirao da se kombinacijom samo triju boja mogu dobiti sve ostale boje. To je tzv. Tristimulusna teorija na koju se 1802. nadovezao engleski fizičar Thomas Young rekavši da se sve boje u prirodi mogu upariti sa tim trima bojama koje je nazvao osnovne ili primarne boje [6]. Također je rekao da ljudsko oko prepoznaje boje pomoću tri tipa fotoreceptora, po jedan za svaku od primarnih boja. Te tri primarne boje ne mogu se dobiti međusobnim miješanjem svjetla drugih boja. Apsorpcija i refleksija pojedinih valnih duljina iz bijelog spektra se dešava po principu komplementarnih boja. Komplementarne su one boje koje su suprotne jedna drugoj primjerice, crvena i cijan ili plava i žuta. Svaka obojena podloga kao filter propušta ili reflektira svjetlo vlastite boje, a apsorbira svjetlo komplementarne boje [6]. Općenito, jedna boja je komplementarna drugoj ako njihova svjetla (reflektirani i apsorbirani dio) zbrajanjem daju bijelo svjetlo [6].

Zavisno o principu miješanja boja, rezultat miješanja komplementarnih boja će biti bijela, crna ili siva boja. Inače, razlikujemo aditivno i suptraktivno miješanje boja.

Aditivna sinteza podrazumijeva svjetlosno zbrajanje pojedinih boja vidljivog dijela spektra pri čemu kao rezultat zbrajanja nastaje bijelo svjetlo. Čovjekovo oko počiva na tom principu kao i elektronički zasloni na računalima i mobitelima. Ljudsko oko percipira tri primarne boje svjetla: plavu, zelenu i crvenu. Sukladno tome, postoje tri različite vrste čunjića, po jedan za svaku primarnu boju. U idealnom pogledu, za doživljaj bijele boje stimulirane su sve tri vrste čunjića. Za doživljaj crne nije potreban nijedan čunjić. Za doživljaj pojedine boje, primjerice plave samo jedna vrsta, a za doživljaj njoj komplementarne, žute, potrebne su pak dvije vrste čunjića.

U kolorimetriji je aditivna sinteza definirana kao RGB sustav (eng. **R**ed-crvena, **G**reen-zelena i **B**lue-plava). Zbrajanjem primarnih boja dobivamo sekundarne boje; crvena i zelena daju žutu (eng. Yellow), zelena i plava daju cijan (eng. Cyan) a plava i crvena daju purpurnu (eng. Magenta). Crna boja ne postoji kod aditivne sinteze.



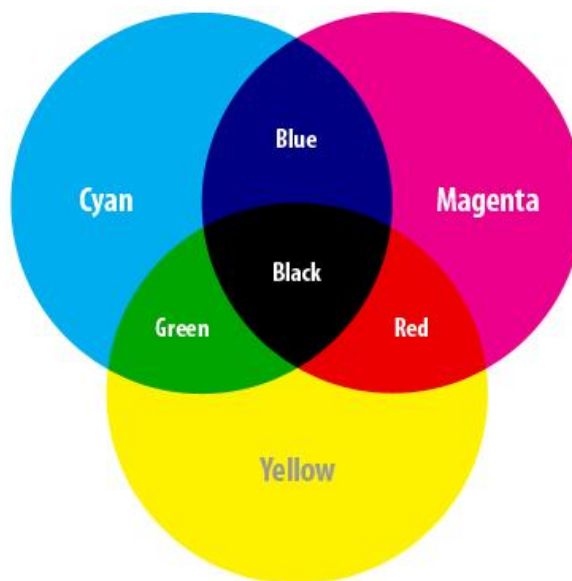


*Slika 16. Aditivna sinteza*

Izvor: <http://www.netsourceinc.com/blog/quick-color-guide>

Suptraktivna sinteza podrazumijeva miješanje boja oduzimanjem jedne ili više boja iz ukupne količine apsorbiranog svjetla pri čemu se javlja crna boja. Koristi se na tiskovnim podlogama od najrazličitijih materijala (papir, karton, keramika, gips i sl.) Suptraktivno miješanje se prvenstveno odnosi na promjenu doživljaja boje nastale prolaskom svjetla ili refleksijom svjetla sa obojene površine tj miješanje svjetlosnih podražaja selektivnom apsorpcijom [6]. Osnova suptraktivnog miješanja je podešavanje svjetlosnih podražaja reflektiranih s obojene površine [6]. Reflektirana svjetlost je obojena, a promatrani objekt je one boje svjetlosti koja je najviše reflektirana.

Za razliku od aditivne sinteze, u suptraktivnoj sintezi tri primarne boje su žuta, cijan i purpurna. Tako primjerice miješanjem purpurne i žute dobijemo žutu boju. Purpurna i žuta su u komplementarnom odnosu tj. purpurna apsorbira žutu iz upadnog svjetla i obrnuto.



*Slika 17. Suptraktivna sinteza*

*Izvor:* <http://editorz.narod.ru/prepress/color.html>

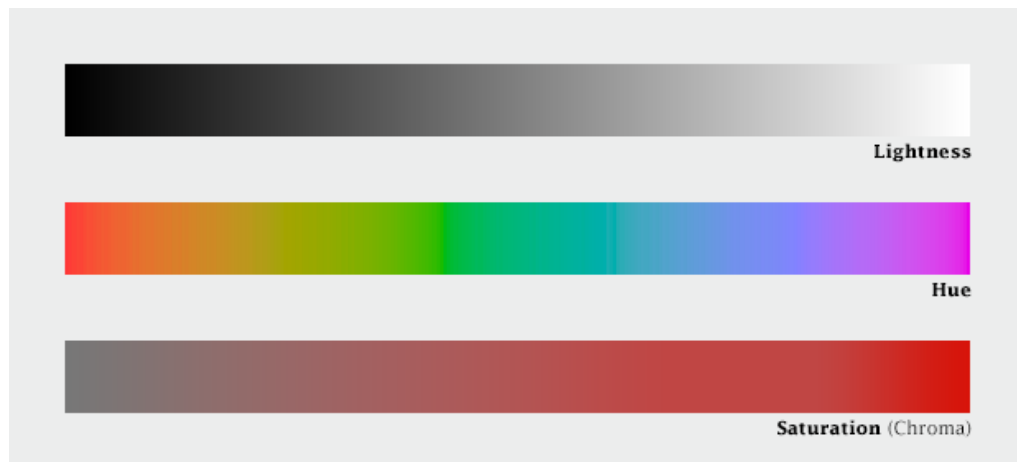
Svaku boju definiraju tri stvari; ton (eng. Hue), zasićenje (eng. Chroma) svjetlina (eng. Lightness). To su dimenzije boje tj. psihološki atributi boje.

Ton boje točno određuje pojedinu boju prema dominirajućoj valnoj duljini svake boje svjetla [6]. Ne ovisi o intenzitetu pojedine boje niti o svjetlini same boje. Kromatske boje su svi tonovi boja raspoređeni u zatvorenom krugu od 0 do 360 stupnjeva [6]. Vrijednost boje se čita u smjeru suprotnom od kazaljke na satu a svaka boja se određuje radijusom kruga [6]. Sredina kruga boje su svi akromatski tonovi od crne preko sivih do bijele boje [6]. Akromatske boje ili neboje su crna, siva, bijela boja tj. boje koje nemaju obojenje.

Svjetlina je pokazatelj koliko je neka boja istog tona svjetla tj. tamna. Označuje se svjetlosnim stupnjevima 0 do 100 gdje 0 označuje apsolutno crno a 100 apsolutno bijelo tijelo [6]. Svjetlina je karakteristika koja opisuje sličnost boje s nizom akromatskih boja, od crne preko sive do bijele [6].

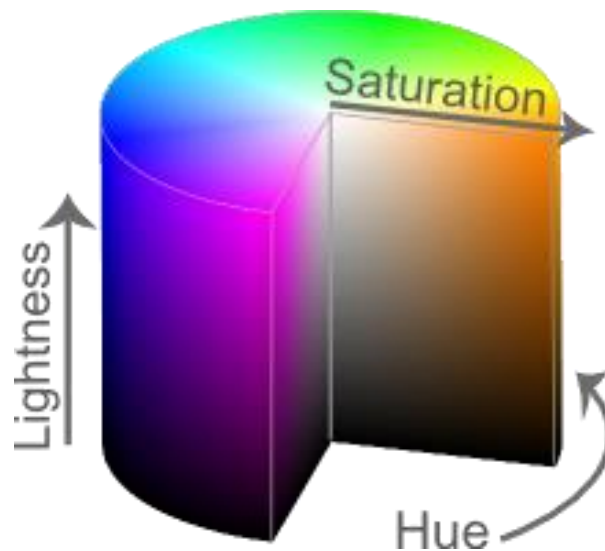
Zasićenje je pokazatelj udjela čiste boje sadržane u ukupnom doživljaju boje [6]. Kromatičnost definira karakter boje svjetla ili neke površine u kontrastu s bijelim [6].

Promjena zasićenosti je neovisna o tonu. Saturacija (eng. Saturation) je stupanj zasićenosti tj. stupanj do kojeg boja ima čisti ton [6].



Slika 18. Ton, zasićenje i svjetlina

Izvor: <http://blog.visual.ly/building-effective-color-scales>



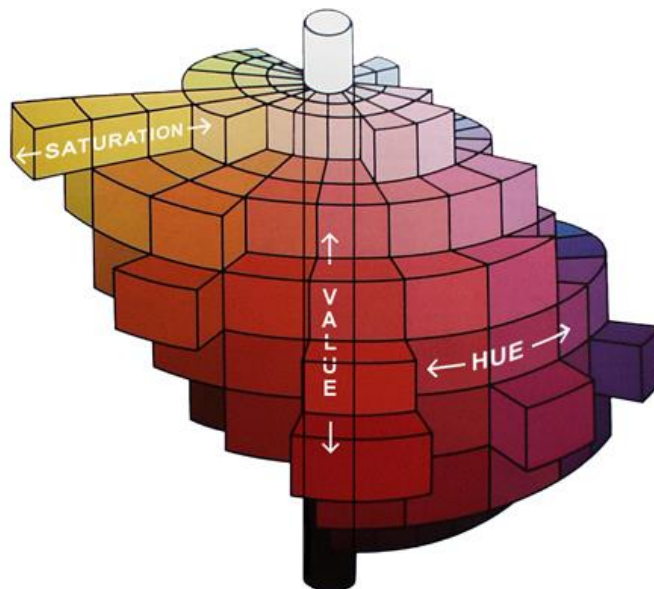
Slika 19. Ton, zasićenje i svjetlina

Izvor: <http://www.wisotop.de/assets/farbmodelle.png>

### 2.2.2. Prostori boja

#### Munsellov prostor boja

Prostor boja koji je razvio Munsell 1905. prema kojem je trodimenzionalni prostor podijeljen na tri dimenzije; ton, svjetlinu i kromu (poznato kao i Munsell hue, Munsell value i chroma). Budući da je inzistirao na numeričkoj klasifikaciji, ton i svjetlost je podijelio na deset razina, po uzoru na decimalni sustav [8]. Svaka od tih razina opet se mogla podijeliti na još 10 podrazina što je na kraju rezultiralo podjelom tona na 100 razina čime se dobila puno veća vizualna jednakost među susjednim tonovima u odnosu na prethodni sustav sa četiri različita tona (crveni, zeleni, plavi i žuti). U Munsellovom novom sustavu, sa pet tonova (crveni, plavi, zeleni, žuti i purpurni), specifične boje pojedinih tonova su se određivale vizualno. Munsell je također utvrdio da tih pet tonova bi međusobnim miješanjem (uz istu svjetlinu i kromu) trebalo dati neutralnu boju [8]. To je demonstrirao izradom globusa podijeljenog na pet tonova.

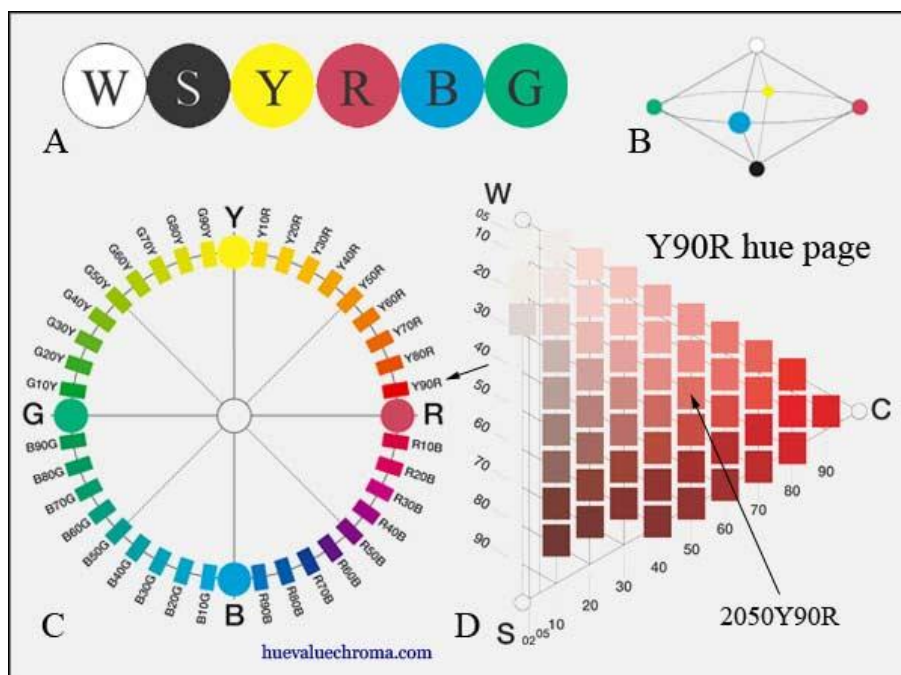


Slika 20. Munsellov prostor boja

Izvor: <http://www.jaimetreadwell.com/Dccc-Munsell-color-chart-system.html>

## NCS prostor boja

NCS (eng. Natural Color System) je prostor boja koji se temelji na šest osnovnih boja (crna, bijela, crvena, plava, zelena i žuta) koje se prema njemačkom psihologu E. Hering-u smatraju prirodnim [8]. Boje se definiraju prema njihovoj sličnosti sa primarnim bojama izraženim u postocima. Elementarne boje se mogu složiti u heksagon te se na taj način mogu vidjeti moguće dopuštene kombinacije prema Hering-ovoj teoriji suprotnosti boja. Tako primjerice elementarna zelena se spaja sa zelenom, crvenom, crnom i bijelom, a ne spaja sa žutom [8]. Elementarne boje su prikazane u trodimenzionalnom prostoru boja pa imamo NCS ton, NCS bijelinu i NCS kromatičnost. Podjelom tog trodimenzionalnog prostora pri konstantnoj crnoj dobivamo krug za ton [8]. Podražaj je određen tonom, bijelinom i kromatičnošću. Primjerice, kod zelene boje sa vrijednostima 10,80,G, broj 10 označava bijelinu, broj 80 kromu i G oznaku za ton [8].

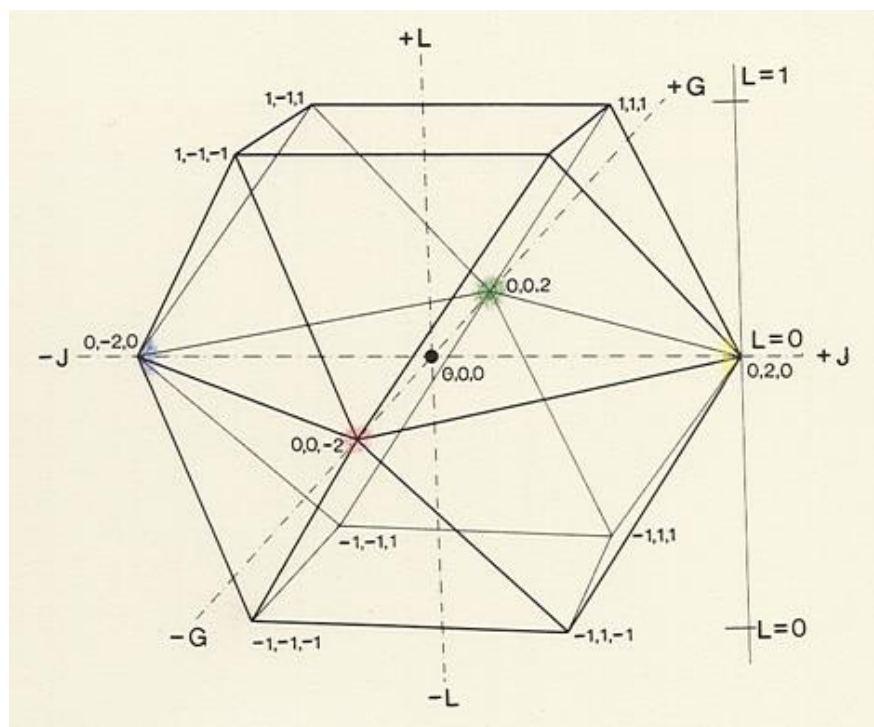


Slika 21. NCS krug i NCS atlas

Izvor: <http://www.huevaluechroma.com/073.php>

## OSA prostor boja

Prostor boja kojeg je razvijalo između 1947. i 1974. Američko optičko društvo. Ispravio defekt kojeg su imali prijašnji sustavi. Konkretno, radilo se o tome da za određeni ton, boja ima jednak vizualni razmak u svakom od prostora boja. Međutim između pojedinih tonova, kromatičnije boje su više udaljene jedne od drugih nego što su to manje kromatične boje. Analizom kristalnih struktura, stvoren je novi, geometrijski oblik (eng. cuboctahedron) sa jednolikim razmakom u svim trima dimenzijama [8]. Jedna dimenzija je svjetlina (eng. Lightness, L), prikazana vertikalnim linijama, druga je crvenost-zelenost (redness-greenness, G), prikazana horizontalnim linijama i treća je žutoća-plavoća (eng. yellowness-blueness, J) prikazana linijama okomitim na prethodne dvije dimenzije [8]. Složenost prostora i otežanost uzimanja uzorka pri konstantnoj kromi ili tonu ograničavaju ovaj prostor boja.



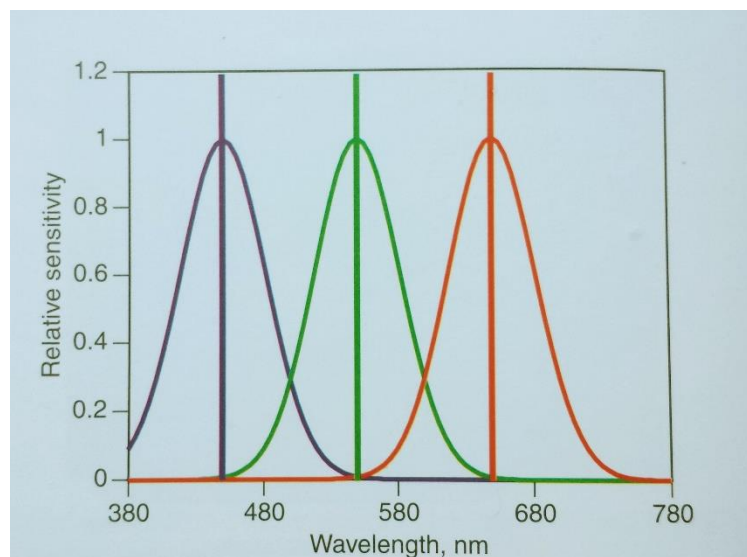
Slika 22. OSA prostor boja

Izvor: [http://www.colorsystm.com/?page\\_id=960](http://www.colorsystm.com/?page_id=960)

## CIE prostor boja

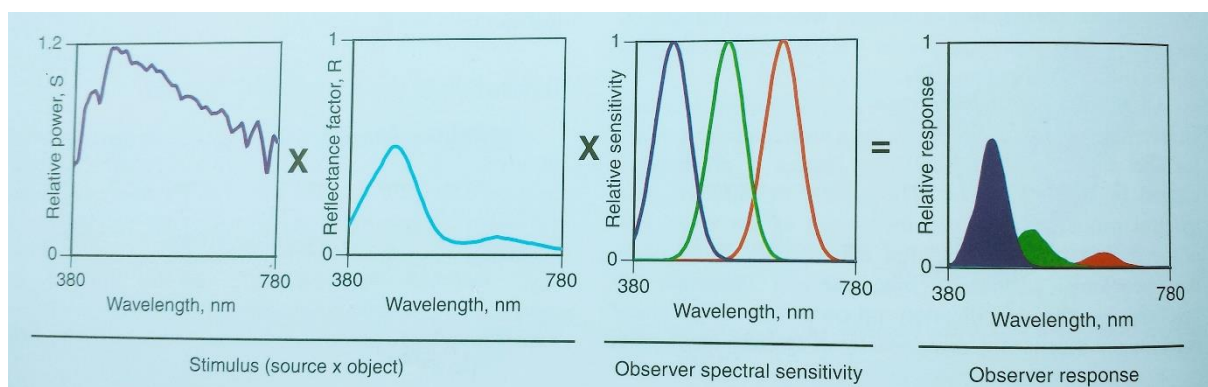
CIE (fran. Commission Internationale de l'Eclairage) internacionalna komisija za rasvjetu, 1931. je standardizirala uređaj za mjerenje vrijednosti boja (kolorimetar) i uvela pojam standardnog promatrača. Standardni promatrač je zapravo statistički podatak dobiven ispitivanjem grupe ljudi zdravog vida na doživljaje različitih boja. CIE komisija je trebala metodu za određivanje crvene, zelene i žuto obojene svjetlosti korištene u željeznici, a kasnije i u prometu [8]. To se ubrzo razvilo u sustav temeljen na mjerenju gdje se stimulans (podražaj) potreban za određivanje mjerio spektralno. Zatim se ta spektralna informacija koristila za izračunavanje standardiziranih kontrola uređaja kako bi prilikom promatranja boje sa uređajem i podražajno, standardni promatrač zaključio da se radi o istoj boji [8]. Spektralna informacija bi se dobila mjerenjem spektralne osjetljivosti prosječnog promatrača i spektralnim mjerenjem podražaja. Za standardiziranje boja potrebno je izraditi kolorimetar koji prikazuje vrijednosti boja koje odgovaraju podražaju idealnog promatrača. Najlakši način je da kolorimetar koristi samo tri svjetlosti pod pretpostavkom da su monokromatične (jedne valne duljine).

Te tri svjetlosti su; plavoljubičasta-450 nm, zelena-550 nm i crvena 650 nm [8]. Svaka od tih boja stimulira samo jedan tip receptora. Promjenom plavoljubičastog, mijenjamo odaziv samo za kratkovalni receptor, promjenom zelenog receptora mijenjamo srednjevalni receptor te promjenom crvene svjetlosti mijenjamo odaziv dugovalnog receptora idealnog promatrača [8].



Slika 23. Spektralne osjetljivosti za plavu, zelenu i crvenu svjetlost

Izvor: R.S Berns(2000.), *Principles of color technology*, Wiley&Sons, New York



Slika 24. Odaziv promatrača ovisi o spektralnoj osjetljivosti receptora i podražaju

Izvor: R.S Berns(2000.), *Principles of color technology*, Wiley&Sons, New York

1964. CIE komisija odlučuje ponovo standardizirati promatrača ovaj put koristeći veći uzorak i veći kut gledanja. Standardni promatrač iz 1931. je utemeljen koristeći žutu pjegu koja ima pokritnost gledanja od 2 stupnja. Razlog tomu leži u činjenici što je dvadesetih godina bilo puno jeftinije koristiti bipartitna polja (dva polja od kojih je jedno referentno dobiveno kombinacijom primarnih boja, a drugo testno dobiveno kombinacijom identičnih primarnih boja s dodatkom testnog svjetla) malih opsega [8]. Uz to, svjetlo koje se koristilo za eksperiment je bilo pomalo maglovito. Pošto žuta pjega ne sadrži



štapiće koje bi mogli ometati čunjićeve signale pri slabijem osvjetljenju, komisija odlučuje provjeriti da li standardni promatrač od 2 stupnja može precizno odrediti podudaranja boja i pri većim poljima gledanja [8]. Na kraju se došlo do zaključka da standardni promatrač iz 1931. ipak vrijedi samo za manja polja podudaranja boja te se istraživanja za podudaranje boja pri većim poljima moraju nastaviti [8].

Standardni promatrač iz 1964. se temelji na većim broju ispitanika, a budući da se radi o većem kutu podudaranja boja pa ima puno veću preciznost. Automobilska industrija je standardizirala tog promatrača vjerojatno zbog toga što je većina obojenih dijelova auta veća od kuta gledanja od četiri stupnja [8].

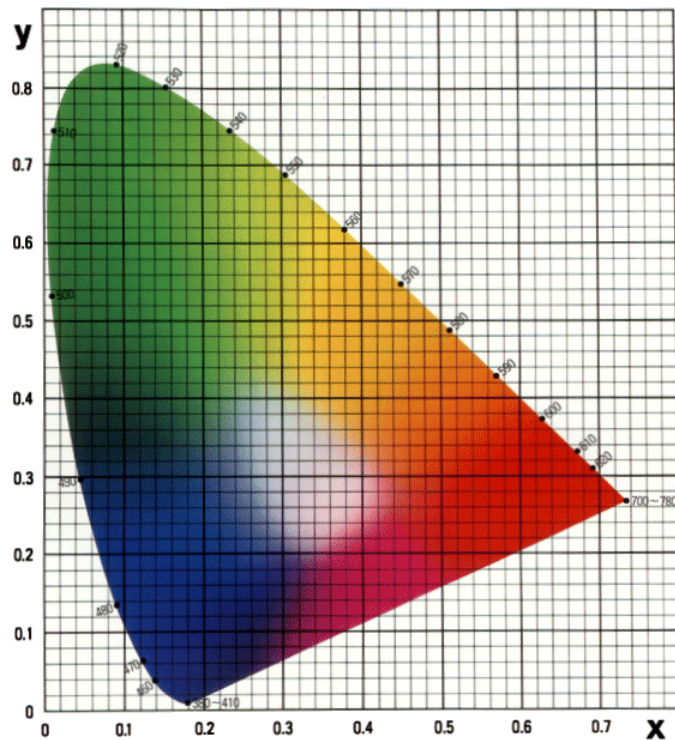


*Slika 25. gornji krug predstavlja polje gledanja od 2 stupnja , a donji polje gledanja od 10 stupnjeva*

*Izvor: R.S Berns(2000.),Principles of color technology, Wiley&Sons, New York*

## CIE XYZ dijagram

Prostor boja koji je definiran u dvodimenzionalnom prostoru. Tristimulusne vrijednosti (definiiraju količine primarnih boja i usklađuju boje za određeni podražaj) su određene sa tri varijable (tono, zasićenje i svjetlina) u trodimenzionalnom prostoru no pretvorbom u dvodimenzionalni prostor, dolazi do gubitka jedne od varijabli (svjetline) a time i do vizualne informacije o nekoj boji [8]. Prema tome položaj boje ovisiti će o izvoru svjetla. Kromatske koordinate  $x, y$  i  $z$  su dobivene iz omjera sume tristimulusnih vrijednosti,  $X+Y+Z$ . Budući da je njihova suma jednaka 1, očito da izuzimanjem jedne od kromatskih koordinati, XYZ dijagram neće moći u potpunosti opisivati neku boju [8]. Nadalje, spomenuti dijagram ustanovljava da li dvije boje imaju isto zasićenje ili kromatičnost i ne govori nam kako te boju izgledaju ili koliko odstupaju jedna od druge ako se ne poklapaju [8]. Stoga se koordinate  $x, y$  i  $z$  ne bi trebale koristiti za izravnu procjenu izgleda boje. U dijagramu crna boja nije prikazana jer odgovara na sve tristimulusne vrijednosti.



Slika 26. CIE XYZ dijagram

Izvor: [http://www.personal.psu.edu/cab38/ColorBrewer/Steve\\_Gardner\\_thesis\\_PSU.pdf](http://www.personal.psu.edu/cab38/ColorBrewer/Steve_Gardner_thesis_PSU.pdf)

## CIE LAB

Trodimenzionalni prostor boja definiran kao pravokutni koordinatni sustav sa osima  $L^*$ ,  $a^*$  i  $b^*$  gdje je  $L^*$  označava svjetlinu,  $a^*$  crveno-zelenu te  $b^*$  žuto-plavu. Zahvaljujući toj trećoj dimenziji svjetline, ovaj prostor boja daje kompletniju sliku o boji. Ispitivanje boja u eksperimentalnom dijelu ovog rada bazirat će se baš na ovom prostoru boja.

Razlike u boji između mjerenog materijala i standarda su definirane razlikama u svjetlu ( $\Delta L$ ), crvenoj-zelenoj ( $\Delta a^*$ ) i žutoj-plavoj ( $\Delta b^*$ ).

$$\Delta L^* = L^*_{\text{mjereno}} - L^*_{\text{standard}}$$

$$\Delta a^* = a^*_{\text{mjereno}} - a^*_{\text{standard}}$$

$$\Delta b^* = b^*_{\text{mjereno}} - b^*_{\text{standard}} \quad (8)$$

Slično tome, razlike u boji su definirane za svjetlinu ( $\Delta L^*$ ), zasićenje ( $\Delta C^*_{ab}$ ) i ton ( $\Delta H^*_{ab}$ ):

$$\Delta L^* = L^*_{\text{mjereno}} - L^*_{\text{standard}}$$

$$\Delta C^* = \Delta C^*_{ab} = (\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

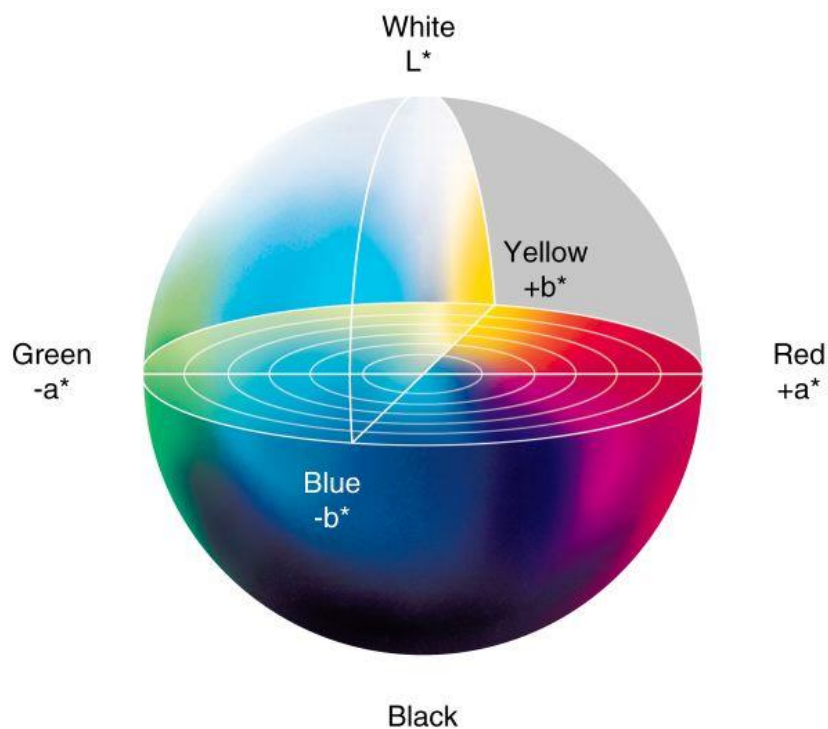
$$\Delta H^*_{ab} = [(\Delta E^*_{ab})^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*_{ab})^2]^{1/2} \quad (8)$$

Ukupna razlika između boje koja se mjeri i referentne (standardne) boje naziva se Euklidska (kolorimetrijska) razlika i u CIE LAB se označava sa  $\Delta E^*_{ab}$ . Može se izračunati na dva načina; koristeći  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  i  $\Delta b^*$  ili  $\Delta L^*$ ,  $\Delta C^*_{ab}$  i  $H^*_{ab}$ .

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (8)$$

Kada je svjetlosna razlika veća od nule ( $\Delta L > 0$ ) mjerena boja uzorka je svjetlija od standardne boje, a ako je ta razlika manja od nule ( $\Delta L < 0$ ) mjerena boja je tamnija od standardne boje. Za mjerenje crvene imamo  $\Delta a^* > 0$ , zelene  $\Delta a^* < 0$ , žute  $\Delta b^* > 0$  te plave  $\Delta b^* < 0$  [8].

No kod mjerenja svjetline boje nailazimo na određena ograničenja. Naime, ako je izmjereni uzorak crvene boje manje crveniji od standarda tada ispada da je zapravo zelene boje. Isto tako, ako je izmjereni uzorak žute boje manje žut od standarda ispada da je plave boje [8].



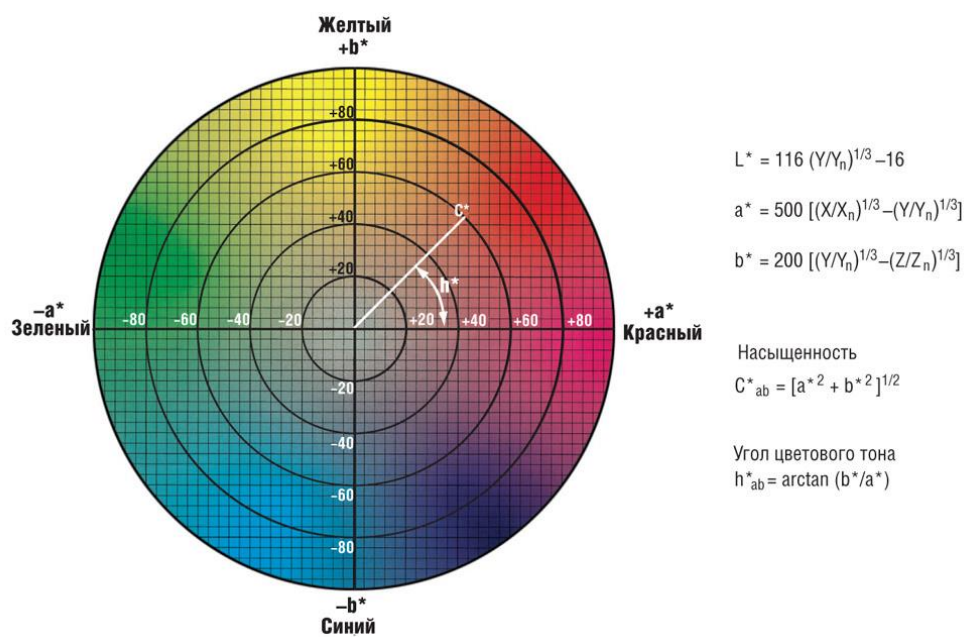
Slika 27. CIE LAB

Izvor: [http://www.mdpi.com/sensors/sensors-14-11943/article\\_deploy/html/images/sensors-14-11943f2-1024.png](http://www.mdpi.com/sensors/sensors-14-11943/article_deploy/html/images/sensors-14-11943f2-1024.png)

Zbog toga se nameće korištenje i ostala dva psihološka atributa boje, a to su ton i zasićenje. Ton je definiran kao kut koji ima vrijednost nula kad je paralelan s  $a^+$  osi. Povećava se u smjeru suprotnom od kazaljke na satu [8].

Kroma ili zasićenje je definirano kao duljina linije od ishodišne točke (neutralna točka) do točke uzorka [8].

Razlike između kuteva tona su razlike u kromi,  $C^*_{ab}$ , a razlike okomite na kut tona su razlike u tonu  $H^*_{ab}$  [8].



Слика 28.  $L, a, b, C_{ab}$  и  $H_{ab}$  vrijednosti boje u CIELAB prostoru boja

Izvor: <http://www.as-media.ru/encyc/colortheory09.jpg>

Za određivanje neutralnih uzoraka poput crne, bijele i sive preporuča se korištenje  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  i  $\Delta b^*$ , a za određivanje uzoraka sa zasićenjem preporuča se uporaba  $\Delta L^*$ ,  $\Delta C^*_{ab}$  i  $H^*_{ab}$  [8].

### 2.2.3 Kolorimetrijska razlika, $\Delta E$

Kolorimetrijska razlika,  $\Delta E$ , je razlika u pozicijama između dva mjerena uzorka u CIELAB koordinatnom sustavu. To je isto što i  $\Delta E_{ab}^*$  i radi se o Euklidskoj razlici tj. razlici u senzaciji koja je dobila naziv po njemačkoj riječi *Empfindung*.

Prvo se mjere LAB vrijednosti dvaju uzoraka, a potom se izračunava njihova udaljenost u koordinatnom sustavu. Razlika u toj udaljenosti je  $\Delta E$ . Pri tom se u obzir uzimaju  $L^*$ ,  $a^*$  i  $b^*$  vrijednosti. Prema tome jednadžba će izgledati otprilike ovako:

$$\Delta E = [(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2]^{1/2} \quad (9)$$

gdje su  $L_1, a_1$  i  $b_1$  LAB mjerenja originala, a  $L_2, a_2$  i  $b_2$  mjerenja reprodukcije.

Izračunavanjem  $\Delta E$ , gubimo informacije o razlikama u  $L^*$ ,  $a^*$  i  $b^*$  kanalima. Pri procjenjivanju boja ili otkrivanju uzroka grešaka potrebno izračunati pojedinačne kolorimetrijske razlike za  $L^*$ ,  $a^*$  i  $b^*$ . Ponekad je korisno znati da kolorimetrijska razlika dolazi većinom od razlike u svjetlini ili kromi [23]. To možemo izračunati na sljedeći način:

$$\Delta L = (L_1 - L_2)$$

$$\Delta c = [(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2]^{1/2} \quad (9)$$

U praksi, vidljiva kolorimetrijska razlika ne mora nužno značiti ponavljanje procesa. Naime, postoji razlika između percipirane i prihvatljive kolorimetrijske razlike. Percipirana kolorimetrijska razlika može kupcu biti prihvatljiva. Razlike u boji manje od  $2 \Delta E$  se ne primjećuju golim okom [9]. Čak razlike manje do  $4 \Delta E$  su prihvatljive većini ljudi. Općenito kod procesa pripreme obrade slike razlike od 4 do  $8 \Delta E$  se smatraju dopuštenim [9]. Svaka grana industrije (ambalažna, automobilska, tekstilna) posebno određuje dopuštene granice odstupanja kolorimetrijske razlike. Zbog oscilacija u procesu

tiska i drugih čimbenika poput opreme i ljudskog vida, smatra se da je besmisleno pokušati reducirati  $\Delta E$  ispod 1 [9].

#### 2.2.4. Instrumentalne metode mjerenja boje

Glavni cilj mjerenja boje je ustanovljavanje onog što promatrač vidi. To se radi pomoću CIE kolorimetrije izračunavanjem tristimulusnih vrijednosti pod standardnim uvjetima pomoću CIE standardnog promatrača. Ovisno o tome što mjerimo razlikujemo pet osnovnih tipova instrumenata za mjerenje boje:

- **Kolorimetar** služi za mjerenje CIE tristimulusnih vrijednosti za odreženi podražaj
- **Spektrometar** služi za mjerenje određenog optičkog svojstva u funkciji valne duljine
- **Jednostavni spektrometar** služi za mjerenje određenog optičkog svojstva na jednom ili više odvojenih mjesta duž spektra
- **Spektrofotometar** služi za mjerenje spektralne reflektancije ili transmitancije
- **Spektroradiometar** služi za mjerenje spektralnog zračenja.

##### Spektrofotometar

Spektrofotometar je uređaj za mjerenje reflektancije ili transmitancije u obliku valnih duljina u vidljivom dijelu spektra. Glavni dijelovi spektrofotometra su izvor optičkog zračenja, optički sustav za definiranje geometrijskih uvjeta mjerenja, sredstvo za raspršivanje svjetlosti te detektor i sustav za obradu signala koji pretvara svjetlost u signale prikladne za analizu. Fizikalna svojstva uzorka određuju izgled tj. dizajn instrumenta. Primjerice, fluorescentni materijali odnosno njihova bojila utječu na dizajn sustava za osvjetljavanje [8].

**Refleksija** je proces pri kojem se upadno svjetlo odbija od materijala koji se osvjetljava [8].

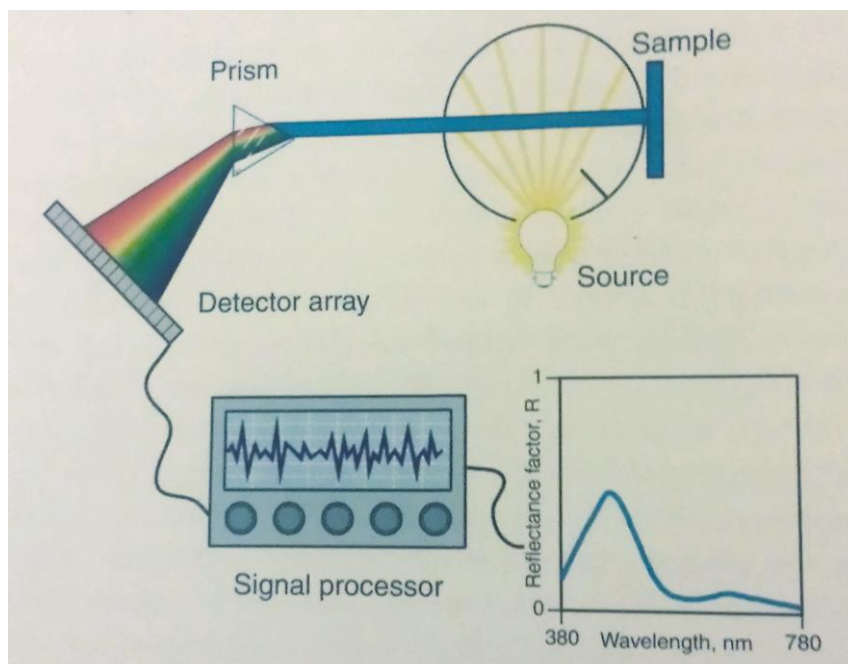
**Reflektancija** je omjer reflektiranog toka svjetlosti sa uzorka i reflektiranog toka svjetlosti sa savršeno reflektirajućeg objekta u istim geometrijskim i spektralnim uvjetima mjerenja [8].



**Transmitancija** je omjer transmitiranog toka svjetlosti i slučajnog toka promatranih u istim geometrijskim i spektralnim uvjetima [8].

Kao izvor svjetla, u spektrofotometriji se može koristiti bilo koje svjetlo sa većom energijom od vidljivog spektra. No, pošto uzorak utječe na spektralna svojstva mjerenja, poželjno je da je izvor svjetla korišten u spektrofotometru sličan izvoru svjetla u promatranom okruženju. U stvarnosti je to nepraktično pa većina uređaja koristi izvore svjetla koji su najbliži karakteristikama izvora D65 između 380 nm i 780 nm [8].

Pomoću CIE geometrije, svjetlost reagira sa uzorkom što dovodi do reflektancije ili transmitancije. Zatim se to svjetlo raspršuje u disperznom sustavu. U početku je to bila prizma, na koju se uski snop svjetlosti projicirao. Prolaskom kroz prizmu došlo bi do disperzije svjetlosti na valne duljine od kojih bi samo jedna prošla kroz prorez. Druga metoda je bila korištenje skupa interferencijskih filtera razmaknutih svakih 10 nm ili 20 nm [8]. Interferencijski filteri su montirani na kolo pomoću kojih je svjetlost pomaknuta za valnu duljinu kao funkcija položaja. Danas su najčešće u uporabi difrakcijske rešetke. Uski snop svjetlosti prolazi kroz staklo sa puno usko posloženih linija pri čemu se svjetlost raspršuje. Još jedna metoda je koristila prizmu i detektorsko polje za pretvaranje energije pri svakoj valnoj duljini u električni signal. Mehanički sustav za skeniranje je bio složen i trebalo je nekoliko minuta za svako mjerenje. Razvojem silikonskih polja sa fotodiodama 1970-ih proces skeniranja je poništen jer je sada dispergirana svjetlost mogla biti direktno usmjerena na polje što je uštedilo vrijeme i pojednostavilo izvedbu uređaja [8].



Slika 29. Shema spektrofotometra sa detektorskim poljem

Izvor: R.S Berns(2000.), *Principles of color technology*, Wiley&Sons, New York

U eksperimentalnom dijelu ovog rada, za mjerenje  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  te X,Y i Z vrijednosti poslužit ćemo se spektroradiometrom naziva Konica Minolta CS-200, prikazan na *sl 15*. U usporedbi sa konvencionalnim tristimulusnim kolorimetrima, ovaj spektroradiometar jako precizno mjeri svjetlinu i kromatičnost pojedinih boja na raznim monitorima. To je moguće zahvaljujući četrdeset ugrađenih senzora koji izračunavaju spektralni odaziv koji odgovara osjetljivosti ljudskog oka. Senzori također pokrivaju cijelo vidljivo područje mutiplicirajući izlaz od svakog senzora sa prikladnim koeficijentima podešavajući na taj način spektralni odaziv uređaja.

Spektroradiometar je uređaj za mjerenje spektralnog zračenja izvora svjetla. Izvor svjetla može biti obična žarulja, projektor ili pak razni optički uređaji poput monitora (LCD, CRT). Spektroradiometar je po konstrukciji vrlo sličan spektrofotometru izuzev izvora svjetla.



*Slika 30. Spektroradiometar Konica Minolta CS-200*

*Izvor: <http://sensing.konicaminolta.asia/products/cs-200-luminance-and-color-meter/>*

### **3. EKSPERIMENTALNI DIO**

#### **3.1 Opis ispitivanja**

U eksperimentalnom dijelu ovog rada objasniti će se uvjeti pod kojim se obavljalo ispitivanje kao i pri tom korišteni mjerni instrumenti i ostali mjerni pribor. Ispitivanje se provodilo u zamračenoj prostoriji (kako bi se izbjegao utjecaj svjetla na rezultate mjerenja) pri temperaturi od 23° i relativnoj vlažnosti zraka od 55 posto. Ispitivanje se obavljalo na laptopu HP 250 G2 Notebook PC pomoću spektroradiometra konica minolta, model CS-200. Mjerni raspon uređaja je od slabog osvjetljenja od 0.01 Cd/m<sup>2</sup> do jakog osvjetljenja od 20 000 000 Cd/m<sup>2</sup>. Otvor objektiva može biti postavljen na vidni kut od 1° (veće površine-srednji i veći lcd ekrani), 0.2° (manje površine-mobilni telefoni) i 0.1° (jako male površine-automobilna,signalna svjetla). Budući da je cilj eksperimenta pokazati za koliko se mijenja gamut boja pri promjeni kuta po x i y osi u odnosu na okomicu ekrana, otvor objektiva se postavlja na maksimalan vidni kut odnosno u ovom slučaju na 1°, jer se ispituje površina ekrana a ne pojedinačni piksel. Spektroradiometar se nalazio na udaljenosti od 35 cm od ekrana laptopa i bio je čvrsto fiksiran na postolje

kako ne bi slučajno došlo do pomicanja prilikom ispitivanja i kako bi uvjeti ispitivanja bili isti.

Spektroradiometar je USB portom spojen na računalo i povezan sa računalnim programom CS-10S na kojem će se prikazati ispitivani rezultati, CIELAB i CIEXYZ vrijednosti. Na laptopu će se boje mijenjati zahvaljujući posebno razvijenom računalnom programu, ChangeColors 1.3 otvorenom u Chrome web pregledniku. U spomenuti program unosimo vrijeme za koje se mijenjaju boje (10 sekundi) i pomak boje (step=64) za koji se razlikuju pojedine boje. Sveukupno ima 125 pomaka boje tj. mjerenja. Primjerice, prva generirana boja u RGB sustavu bi bila 64 0 0, druga 128 0 0, treća 192 0 0 četvrta 256 0 0 itd. Svaka boja se na ekranu zadržava 10 sekundi. Kada smo definirali te postavke pokrenuli smo promjenu boje, sačekali 3 sekunde i onda aktivirali CS-10S. Najprije smo određivali CIELAB i CIEXYZ vrijednosti ispitivanjem na okomicu ekrana, a potom smo postavili ekran pod 45° u odnosu na normalu po x-osi u odnosu na spektroradiometar i odredili iste vrijednosti i na kraju smo postavili ekran pod 45° u odnosu na normalu po y-osi u odnosu na spektroradiometar i po treći put odredili potrebne vrijednosti. Važno je pripomenuti i da je svjetlina ekrana tokom ispitivanja postavljena na maksimum, a „sleep mode“ je isključen kako se ekran ne bi ugasio prije završetka ispitivanja. Ispod monitora nalazio se list papira sa obilježenim kutevima kako bi rezultati mjerenja bili što precizniji.

## **3.2. Rezultati mjerenja**

### **3.2.1 Usporedba mjerenja pod drugim kutevima**

Dobiveni rezultati mjerenja se spremaju kao text ili CES dokument. Podaci se potom prebacuju u excel program gdje se računa kolorimetrijska razlika  $\Delta E$ , iz L, a i b vrijednosti dobivene ispitivanjem pod pravim kutem i ispitivanjem pod kutem od 45 po x osi. Zatim se računa aritmetička sredina od  $\Delta E$ , minimalan i maksimalan  $\Delta E$ , te medijan i standardna devijacija. Isti postupak se ponavlja za izračunavanje  $\Delta E$  za L,a i b vrijednosti dobivene ispitivanjem pod pravim kutem i pod kutem od 45 na y os. Korištene matematičke funkcije su median(), Average(), Min(), Max() i stdev(). Zahvaljujući tim formulama dobit ćemo podatke na osnovu kojih ćemo točno za koliko se točno povećao ili smanjio gamut boja lcd zaslona na mjerenom laptopu. Budući da se radi o lcd tehnologiji prikaza informacije na ekranu očekuje se smanjenje gamuta boja. Za

ispitivanje se upotrebljavao lcd monitor koji koristi aktivnu matricu (TFT) koja omogućuje kontrolu nad individualnim pikselima za razliku od pasivne matrice. Zbog povoljnije cijene i brzog odaziva monitora (vrijeme za koje piksel prijeđe iz aktivnog u inaktivno stanje) takvi lcd zasloni su prikladniji za uredske poslove i video igrače dok će noviji tipovi TFT lcd zaslona poput super-TFT-a (poznatiji kao IPS) koji inače pružaju bolji kontrast slike i saturaciju boja te veće kuteve gledanja uz sporije vrijeme odaziva biti prikladniji za grafičke dizajnere. Popularna američka IT kompanija Apple koristi baš IPS tehnologiju u zaslonima svojih računala.

Rezultati mjerenja su prikazani na tablici 1.

*Tablica 1. Rezultati mjerenja- promjena kuta*

Kut	Aritmetička Sredina( $\Delta E$ )	Minimum ( $\Delta E$ )	Median ( $\Delta E$ )	Maksimum ( $\Delta E$ )	Standardna Devijacija( $\Delta E$ )
45° na x os	74,3	15,6	76,0	129,1	22,3
45° na y os	81,1	10,9	82,8	157,2	35,3

Iz rezultata mjerenja je vidljivo da dolazi do određenog odstupanja od položaja boja dobivenih mjerenjem Lab vrijednosti pod pravim kutem. Također se daje zamijetiti kako je kolorimetrijska razlika veća pri kutu gledanja od 45° stupnjeva s obzirom na y-os ekrana. Sukladno tome, volumen gamuta bi također trebao biti manji od volumena gamuta dobivenog pod 45° u odnosu na os-x zaslona. Drugim riječima, kada bi promatrali nekakvu sliku pod pravim kutem, a potom pod kutem od 45 ili nekim drugim kutem, ta slika više ne bi bila ista. Pod tim se misli da ne bi imala isti kontrast kao pri pravim kutem niti isto zasićenje i svjetlinu.

### 3.2.2 Usporedba gamuta

Kada kažemo gamut boja tada mislimo na opseg boja koji neki uređaj može prikazati. Gamut ovisi o uređaju, mediju i uvjetima promatranja. Ljudsko oko zapravo ima najveći gamut, potom zaslone uređaja i na kraju tiskarski otisak na raznim tiskovnim podlogama. Rezultati su prikazani u tablici 2.

*Tablica 2. Gamuti u ovisnosti o kutu gledanja*

Kut	Volumen
90 °	1.44E+0.6
45° po x-osi	7.71E+0.4
45° po y-osi	1.13E+0.4

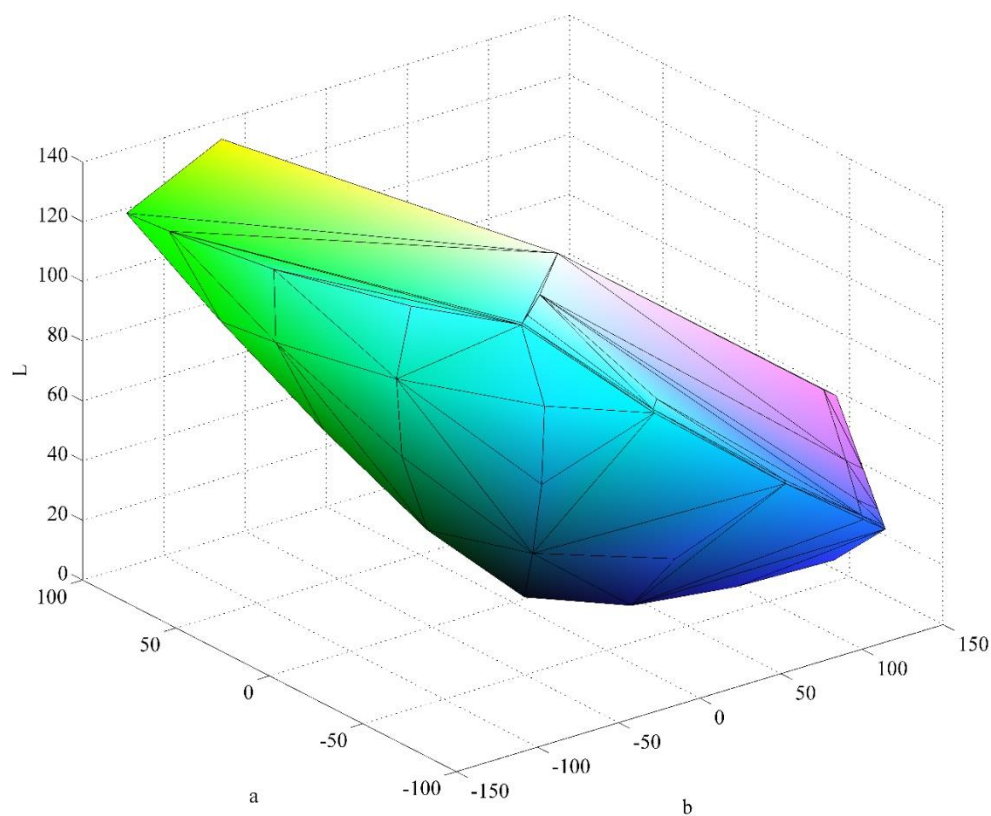
Za što bolje shvaćanje za koliko se gamut promijenio izračunali smo i smanjenje volumen gamuta izraženo u postocima. Rezultati su prikazani u tablici 3.

*Tablica 3. Preostali volumen gamuta mjeren pod kutevima u postocima*

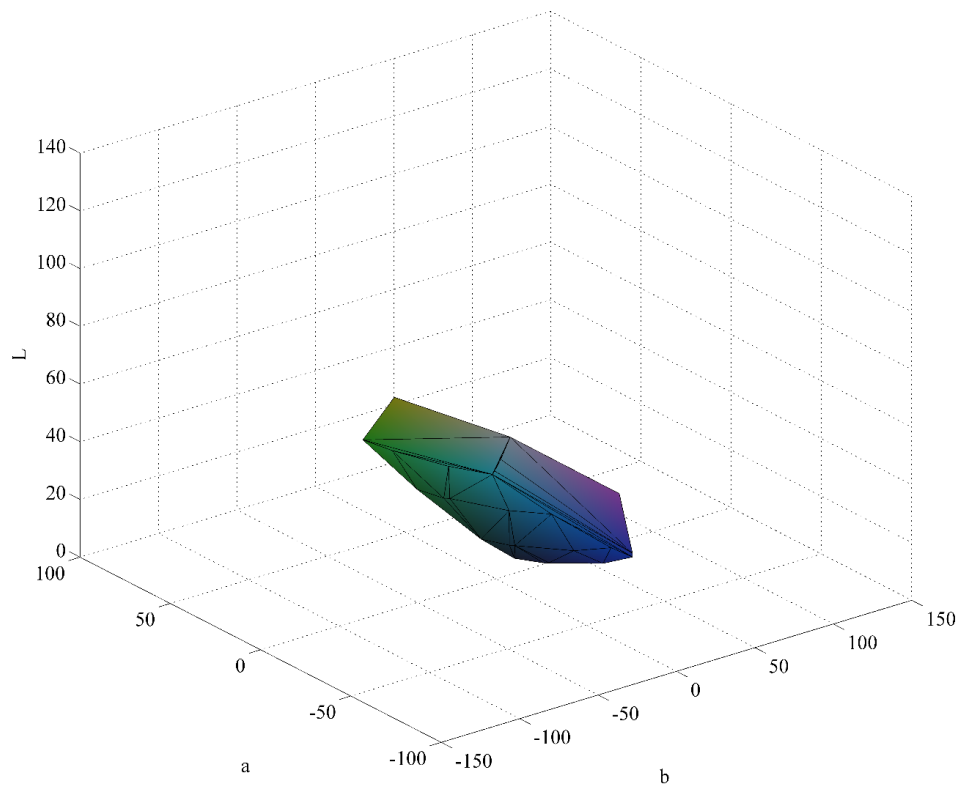
Kut	Volumen
45° po x-osi	5.338%
45° po y-osi	0.786%

Iz prikazanih rezultata je vidljivo da pri promjeni kuta gledanja dolazi do značajnog smanjenja gamuta tj. kvalitete prikaza boja na zaslonu ispitivanog monitora. Pri tom je smanjenje veće pri promjeni kuta u odnosu na normalu po y-osi ekrana što smo prvotno i pretpostavili. Time smo dokazali da se najbolji prikaz opsega boje daleko najbolje postiže pri okomitom promatranju na zaslon monitora.

Kako bi mogli vizualno pojmiti o koliko velikom smanjenju gamuta se radi, generiran je grafički prikaz gamuta u  $L^*a^*b^*$  prostoru boja za svako ispitivanje na osnovu kojeg se jasno vidi koliko je to u biti smanjenje. Na slici 31. je prikazan gamut generiran prema rezultatima dobivenim ispitivanjem pod pravim kutem.

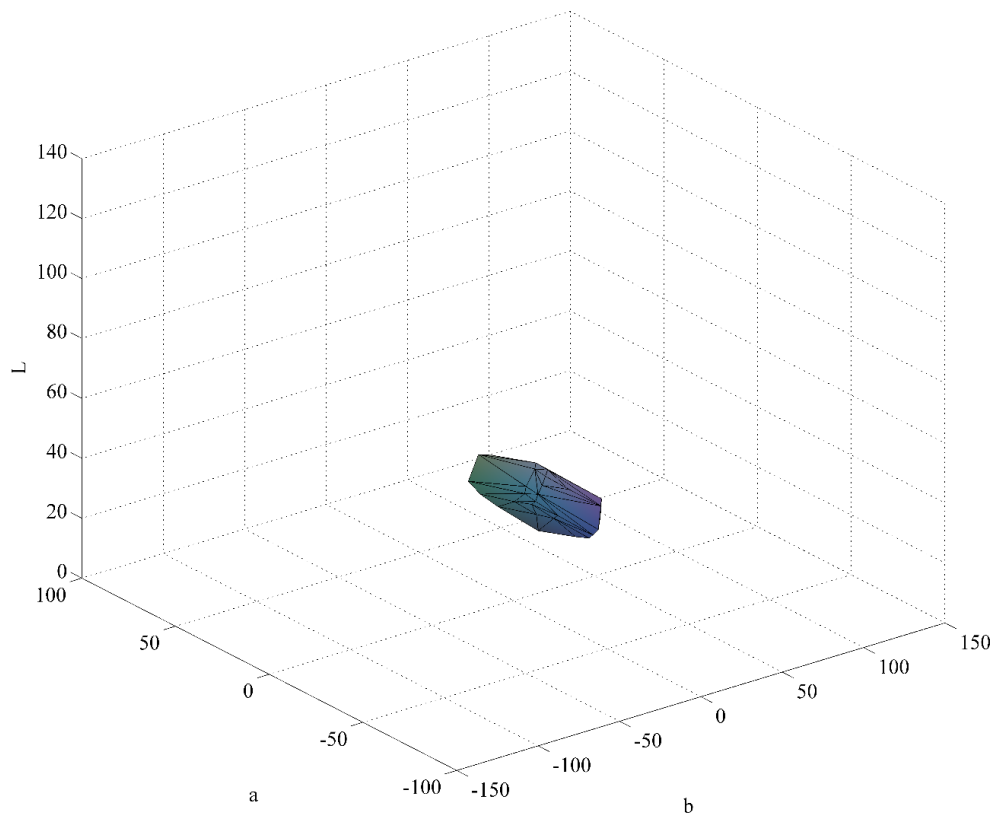


*Slika 31. Grafički prikaz gamuta zaslona ispitivanog pod pravim kutem.*



*Slika 32. Grafički prikaz gamuta zaslona ispitivanog pod kutem od 45 stupnjeva u odnosu na normalu po  $x$ -osi*





*Slika 33. Grafički prikaz gamuta zaslona ispitivanog pod kutem od 45 stupnjeva u odnosu na normalu po y-osi*

## 4. ZAKLJUČAK

Može se zaključiti da kut pod kojim promatramo zaslon laptopa baziranog na lcd tft tehnologiji uvelike utječe na kvalitetno prikazivanje boja. To ujedno predstavlja i glavni nedostatak te tehnologije prikaza informacije na ekranu. Zbog toga lcd tehnologija ima jaku konkurenciju u borbi za tržište mobitela i tableta. Uspoređujući rezultate dobivene mjerenjem pod različitim kutevima ustanovljeno je da je optimalni kut gledanja pravi kut, jer je gamut boja pod tim kutim najveći. Promjenom kuta dolazi do drastičnog smanjenja gamuta što je dokazano usporedbom izračunatih volumena volumena.

Ovim istraživanjem je potvrđena hipoteza da gamut lcd ekrana ovisi o kutu promatranja te stoga izgled slike na lcd monitoru uvelike ovisi o kutu pod kojim se slika promatra.

## 5. LITERATURA

1. R.H.Chen (2011.) Liquid crystal displays fundamentals, Wiley&Sons, New Jersey
2. H. Kawamoto (2002.) The History of Liquid-Crystal Displays, Silicon Image, Nara
3. F. Ross, M. Rao (2006.) Developments in LCDs, Pira International, Guildford
4. J.A.Castellano (2005.) Liquid Gold, World Scientific Publishing, Singapore
5. T. Tsukada (1996.) Liquid-Crystal Displays Addressed by Thin-Film Transistors, OPA, Tokyo
6. Đ. Parac-Osterman (2007.), Osnove o boji i sustavi vrednovanja, Grafički zavod Hrvatske, Zagreb
7. D. Malacara (2011.), Color vision and Colorimetry, SPIE, Bellingham
8. R.S Berns (2000.), Principles of color technology, Wiley&Sons, New York
9. A. Sharma (2004.), Understanding Color Management, Cengage Learning, New York
10. Kancir H. (2014.), Usporedba kolorimetrijskih karakteristika lcd i amoled tehnologija zaslona, diplomski rad, sveučilište u Zagrebu

## 6. POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz principa gost-domaćin .....	4
Slika 2. Prvi LCD digitalni sat koji je koristi DSM.....	5
Slika 3. Kretanje molekula tekućih kristala .....	6
Slika 4. TN princip sa i bez primjene električnog polja .....	7
Slika 5. Prvi proizvod TN principa:digitalni sat .....	8
Slika 6. 7 polja ili sektora .....	9
Slika 7. konfiguracija 8 .....	9
Slika 8. Gornja(lijevo) i donja(desno) elektroda .....	9
Slika 9. Zaslon sa pasivnom i aktivnom matricom .....	11
Slika 10. Sastavni dijelovi TFT LCD-a .....	12
Slika 11. IPS LCD tehnologija .....	14
Slika 12. VA LCD tehnologija .....	15
Slika 13. MVA LCD tehnologija .....	16
Slika 14. Vidljivi dio spektra elektromagnetskog zračenja .....	17
Slika 15. Newton-ov eksperiment sa staklenom prizmom .....	18
Slika 16. Aditivna sinteza .....	20
Slika 17. Suptraktivna sinteza.....	21
Slika 18. Ton, zasićenje i svjetlina .....	22
Slika 19. Ton, zasićenje i svjetlina .....	22
Slika 20. Munsellov prostor boja .....	23
Slika 21. NCS krug i NCS atlas .....	24
Slika 22. OSA prostor boja .....	25
Slika 23. Spektralne osjetljivosti za plavu, zelenu i crvenu svjetlost .....	27
Slika 24. Odaziv promatrača ovisi o spektralnoj osjetljivosti receptora i podražaju.....	27
Slika 25. gornji krug predstavlja polje gledanja od 2 stupnja , a donji polje gledanja od 10 stupnjeva .....	28
Slika 26. CIE XYZ dijagram .....	30
Slika 27. CIE LAB .....	32
Slika 28. L,a,b,Cab i Hab vrijednosti boje u CIELAB prostoru boja .....	33
Slika 29. Shema spektrofotometra sa detektorskim poljem.....	37
Slika 30. Spektroradiometar Konica Minolta CS-200 .....	38
Slika 31. Grafički prikaz gamuta zaslona ispitivanog pod pravim kutem. ....	42
Slika 32. Grafički prikaz gamuta zaslona ispitivanog pod kutem od 45 stupnjeva u odnosu na normalu po x-osi .....	43
Slika 33. Grafički prikaz gamuta zaslona ispitivanog pod kutem od 45 stupnjeva u odnosu na normalu po y-osi .....	44

## **7. POPIS TABLICA**

Tablica 1. Rezultati mjerenja- promjena kuta.....	38
Tablica 2 Gamuti u ovisnosti o kutu gledanja.....	39
Tablica 3 Preostali volumen gamuta mjeren pod kutevima u postocima.....	40